



**Madelina dos Anjos Sibumbe**

Licenciada em Ciências de Engenharia Mecânica

**Desenvolvimento de um sistema de  
monitorização de vibrações em  
equipamentos rotativos**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Mecânica

Orientador: Tiago Silva, Prof. Aux. Convidado, FCT-UNL  
Co-orientador: António Urgueira, Prof. Assoc., FCT-UNL

Júri:

Presidente:	Prof. Doutor António José Freire Mourão
Vogais:	Prof. Doutor António Afonso Roque
	Prof. Doutor Tiago Alexandre Silva



## **Desenvolvimento de um sistema de monitorização de vibrações em equipamentos rotativos**

Copyright © 2017 Madelina dos Anjos Sibumbe, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



Aos meus pais Felicina Chembene e Gildo Sibumbe, à minha avó Ester Isaltina, ao meu irmão Rogério e às minhas queridas irmãs Carmen, Quete, Leopoldina, Tânia e Lácia pelo apoio incondicional, pelos valores e ensinamentos transmitidos ao longo de todo o meu percurso até aqui.



## **Agradecimentos**

Quero expressar o meu profundo agradecimento ao meu orientador, Professor Doutor Tiago Silva e ao meu co-orientador Professor Doutor António Urgueira pelo apoio científico e moral, pela disponibilidade para esclarecimento de dúvidas durante esta fase que não foi fácil.

Agradeço à Datanálise, empresa de engenharia de manutenção especializada na manutenção condicionada, em particular ao Eng.º António Roque, por me ter sido facultado o simulador de falhas durante o mês de agosto e pelo apoio científico.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial (DEMI) da Faculdade de Ciências e Tecnologia, da Universidade Nova de Lisboa (FCT-UNL), pelo fornecimento do equipamento e condições de apoio para a dissertação.

Aos meus colegas em especial ao Pedro Riscado pelo apoio académico durante esta fase.

Aos meus amigos Tiago Rodrigues, Ana Sousa e Jéssica Bernardo por tudo.

Aos meus pais, irmãs e avós que sempre acreditaram e apostaram em mim, sem eles esta etapa não teria sido possível, pois o seu apoio foi incondicional.



# Resumo

Pretende-se desenvolver um sistema de monitorização no âmbito das vibrações mecânicas para a deteção e correção de avarias em equipamentos rotativos. Neste trabalho faz-se uma breve introdução sobre a manutenção baseada na condição e processamento de dados, bem como sobre os tipos de avarias típicas e explica-se a relevância que este assunto tem para a indústria moderna. Para além disto, apresenta-se o desenvolvimento de um sistema de monitorização para deteção e diagnóstico de avarias em equipamentos rotativos, faz-se uma análise com o recurso à transformada rápida de Fourier e procede-se à equilibragem de um equipamento rotativo.

Este modelo permite simular e adquirir sinais utilizando uma placa de aquisição.

De entre os tipos de manutenção existentes, nomeadamente a manutenção corretiva, a manutenção preventiva sistemática, e a manutenção preventiva condicionada. Explicita-se a que permite a obtenção de níveis produtivos elevados dos equipamentos, garante a segurança dos operadores e equipamentos, garante uma boa qualidade, pode conduzir à redução de custos de manutenção, e que garante a disponibilidade dos equipamentos para a produção.

Neste documento descreve-se de uma forma geral os tipos de avarias mais comuns em máquinas rotativas.

Para ajudar com o desenvolvimento de um sistema com base em sensores que permita obter em tempo real a resposta dinâmica de elementos rotativos será utilizada a ferramenta “LabView.

A aplicação criada no LabView está preparada tanto para a simulação de sinais tipo como para a aquisição de sinais reais, esta capacidade tem com fim a possibilidade de verificar o algoritmo desenvolvido.

Como caso de estudo experimental considera-se a equilibragem dinâmica de um equipamento rotativo em ambiente laboratorial. O método foi a equilibragem multiponto que é a generalização do método de equilibragem dinâmica para múltiplos sensores e planos de equilibragem. E por fim, é feita uma verificação dos resultados com o coletor de dados ENPAC.

## **Palavras chave:**

Equilibragem dinâmica

Equipamentos rotativos

Manutenção baseada na condição

Vibrações mecânicas

## **Abstract:**

It is intended to develop a monitoring system in the field of mechanical vibrations for the detection and correction of faults in rotating equipment. In this work we make a brief introduction about the condition based maintenance and data processing, as well as about the types of typical failures and explains the relevance that this subject has in modern industry. In addition to this, the development of a monitoring system for detecting and diagnosing faults in rotating equipment is performed, using the fast fourier transform and balancing of a rotating equipment.

This model allows you to simulate and acquire signals using an acquisition board.

Among the existing types of maintenance, namely corrective maintenance, systematic preventive maintenance, and conditional preventive maintenance. It is explained that it allows to obtain high production levels of equipment, guarantees the safety of operators and equipment, guarantees a good quality, can lead to reduction of maintenance costs, and ensures the availability of equipment for production.

This document describes in general the types of faults most common in rotative machines.

To help with the development of a sensor-based system that allows the dynamic response of rotating elements to be obtained in real time, the "LabView" tool will be used.

The application created in LabView is prepared for both the simulation of type signals and for the acquisition of real signals, this capability has the purpose of verifying the algorithm developed.

As a case study, the dynamic balancing of rotating equipment in a laboratory environment is considered. The method was the multipoint balancing that is the generalization of the dynamic balancing method for multiple sensors and balancing planes.

### **Keywords:**

Dynamic balancing

Rotary equipment

Condition based maintenance

Mechanical vibration



<b>1</b>	<b>Introdução</b>	1
1.1	Motivação	1
1.2	Contexto	1
1.3	Estrutura da dissertação	3
1.4	Manutenção baseada na condição	4
1.5	Identificação da Origem das Vibrações	4
1.5.1	Desequilíbrio	5
1.5.2	Eixo empenado	6
1.5.3	Desalinhamento	7
1.5.4	Folgas	8
1.5.5	Defeitos em chumaceiras de Rolamento	9
1.5.6	Defeitos em polias e correias	9
1.5.7	Defeitos em chumaceiras de escorregamento	10
1.5.8	Defeitos em Engrenagens	11
1.6	Implementação computacional	12
1.7	Série de Fourier	14
1.7.1	Transformada de Fourier (FT)	15
1.7.2	Transformada discreta de Fourier (DFT)	16
1.7.3	Transformada Rápida de Fourier (FFT)	16
<b>2</b>	<b>Vibrações em elementos rotativos</b>	19
2.1	Uma visão geral de análise de vibrações	19
2.2	Análise espectral usando a Transformada Rápida de Fourier (FFT)	22
2.3	Aplicação de janelas	24
2.3.1	Retangular	25
2.3.2	Hanning	26
2.3.3	Hamming	27
2.3.4	Triangular	27
2.3.5	Kaiser-Bessel	28
2.3.6	Flat top	29
2.4	Largura de banda (Bandwidth)	30
2.5	Aliasing	31
2.5.1	Teorema de amostragem	32
2.6	Média de janela de aquisição	37
2.7	Sobreposição de janelas de aquisição	37
2.8	Grandezas na medição	38
2.9	Amplitudes de vibração	39
2.10	Aplicação em LabView	39

<b>3</b>	<b>Parte experimental</b> .....	47
3.1	Sensores de vibração (acelerómetros) .....	47
3.2	Montagem da placa de aquisição.....	49
3.3	Montagem do trigger.....	50
3.4	Suporte para os acelerómetros.....	51
3.5	Criação do software (DAQ) .....	51
3.6	Equilibragem .....	53
3.6.1	APLICAÇÃO: Caso em que a amplitude da segunda leitura aumenta relativamente a primeira leitura: .....	54
3.6.2	APLICAÇÃO: Caso em que a amplitude da segunda leitura diminui relativamente a primeira leitura: .....	57
3.6.3	Verificação dos resultados: Coletor de dados ENPAC .....	60
<b>4</b>	<b>Conclusões e proposta de trabalhos futuros</b> .....	63
<b>5</b>	<b>Bibliografia</b> .....	65
<b>6</b>	<b>Anexo</b> .....	69

## Índice de figuras

Figura 1 - Espectro do Desequilíbrio (adaptado de Scheffer e Girdhar, 2004).....	5
Figura 2 - Espectro do veio empenado (adaptado de Scheffer e Girdhar, 2004) .....	6
Figura 3 - Espectro do Desalinhamento paralelo (adaptado de Scheffer e Girdhar, 2004).....	7
Figura 4 - Espectro do Desalinhamento angular (adaptado de Scheffer e Girdhar, 2004).....	8
Figura 5 - Espectro de defeitos em rolamentos de elementos rolantes (adaptado de Scheffer e Girdhar, 2004).....	9
Figura 6 - Espectro de defeitos em polias e correias (adaptado de Scheffer e Girdhar, 2004) .....	10
Figura 7 - Espectro de defeitos em rolamentos periódicos (adaptado de Scheffer e Girdhar, 2004).....	11
Figura 8 - Espectro do defeito de engrenagens (adaptado de Scheffer e Girdhar, 2004).....	12
Figura 9- Ilustração de uma VI programada em LabView (block diagram.) .....	13
Figura 10- Ilustração de uma VI programada em LabView (front painel).....	13
Figura 11 - Exemplo das três primeiras somas parciais de uma série de Fourier, primeira soma parcial (S1), segunda soma parcial (S2) e terceira soma parcial (S3).....	14
Figura 12 - exemplo de um sinal no domínio do tempo com janela (vermelho) e sem janela (azul) .....	15
Figura 13 - exemplo de um sinal no domínio da frequência .....	15
Figura 14 - FFT aplicada a uma máquina (Scheffer e Girdhar, 2004) .....	16
Figura 15 - Exemplo de uma FFT obtida no LabView .....	17
Figura 16 – Exemplo de um movimento periódico (função harmónica).....	20
Figura 17 -Gráficos convertidos de unidades de aceleração para unidades de velocidade (a) e para unidades de deslocamento (b) de um sinal sinusoidal simulado .....	21
Figura 18 - Sinal em domínio temporal de uma função sinusoidal sem ruído (desativado) .....	23
Figura 19 - Espectro de frequência (janela hanning - Peak) .....	23
Figura 20 - Espectro de frequência do sinal sinusoidal.....	24
Figura 21-Janela retangular .....	25
Figura 22-Janela Hanning .....	26
Figura 23-Janela Hamming .....	27
Figura 24-Janela Triangular .....	28
Figura 25- Janela Kaiser-Bessel.....	29
Figura 26-Janela flat top.....	30
Figura 27 - Filtro anti-aliasing (filtro passa baixo) .....	31
Figura 28 – Tipos básicos de filtros anti-aliasing (National Instruments, 1998) .....	32
Figura 29 - Representação dos três sinais afetados pelo fenómeno do aliasing em domínio temporal (a), e domínio de frequência (b).....	33
Figura 30 - Representação dos três sinais sem o fenómeno do aliasing em domínio temporal (a), e domínio de frequência (b)) .....	34
Figura 31 – Comportamento do sinal reconstituído quando uma das frequências do sinal é igual a metade da frequência de amostragem .....	35
Figura 32 - Comportamento do sinal reconstituído quando uma das frequências é aproximada à metade da frequência de amostragem (LabView).....	36
Figura 33 – Aplicação em LabView (parte 1 – <i>Diagrama de blocos</i> ) .....	40
Figura 34 - Aplicação em LabView (parte 1 – <i>Painel frontal</i> ) .....	40
Figura 35 – Bloco para selecionar a unidade a selecionar no front painel .....	41
Figura 36 -Case conversor de unidades para aceleração .....	41
Figura 37 - Aplicação em LabView (parte 2 – <i>Diagrama de blocos</i> ).....	42
Figura 38 - Aplicação em LabView (parte 2 – <i>Painel frontal</i> ) .....	42
Figura 39 – Aplicação em LabView (parte 3 – <i>Diagrama de blocos</i> ) .....	42
Figura 40 – Aplicação em LabView (parte 3 – <i>Painel frontal</i> ).....	43
Figura 41 – Aplicação em LabView (parte 4 – <i>Diagrama de blocos</i> ) .....	43
Figura 42 - Aplicação em LabView (parte 4 – <i>Front Painel</i> ) .....	44
Figura 43 - Determinação de limites de velocidades baseado na norma ISO 10816 - parte 3 ....	44
Figura 44 - Níveis de alerta para a evolução do nível global .....	45

Figura 45 - Nível global de vibração com os respetivos níveis de alerta .....	45
Figura 46 - Simulador de falhas – Laboratório de Mecânica Estrutural da FCT .....	47
Figura 47 - Acelerómetro MEMS triaxial ADXL335 .....	48
Figura 48 - Algoritmo usado para a calibragem dos acelerómetros vertical (X) e horizontal (Y) .....	48
Figura 49 - Placa National Instruments .....	49
Figura 50 - National Instruments USB 6008 pinout utilizado.....	49
Figura 51 – Trigger/ detetor de fase .....	50
Figura 52 - Suporte para o acelerómetro .....	51
Figura 53 – Calibração dos canais dos acelerómetros.....	52
Figura 54 - Bloco: simulação ou aquisição .....	52
Figura 55 - Primeira leitura .....	54
Figura 56 - Segunda leitura .....	55
Figura 57 – Leituras de amplitude e fase, e vetor massa de correção .....	55
Figura 58 – Correção.....	56
Figura 59 - Resultados .....	56
Figura 60 - Primeira leitura .....	57
Figura 61 - Segunda leitura .....	58
Figura 62 - Leituras de amplitude e fase, e vetor massa de correção.....	58
Figura 63 - Correção .....	59
Figura 64 -Resultados .....	59
Figura 65- Pontos de leitura do transdutor com o coletor de dados <i>ENPAC</i> .....	60

## Índice de tabelas

Tabela 1 - Dados de amplitude e frequência da simulação em LabView.....	23
Tabela 2 - Dados de amplitude e frequência para exemplificar o efeito do aliasing.....	32
Tabela 3 - Valores de severidade de vibração sugeridos na norma ISO 10816-3 .....	46
Tabela 4 - Zonas de avaliação da severidade de vibração segundo a norma ISO 10816-1 .....	46
Tabela 5 - Redução de amplitude.....	57
Tabela 6 - Redução de amplitude.....	60
Tabela 7 - Resultados obtidos pelo coletor de dados <i>ENPAC</i> (sensor a sensor).....	61
Tabela 8 - Redução de amplitude (pelo coletor de dados <i>ENPAC</i> ).....	61



## Simbologia

M	Massa	[kg]
C	Inverso da sensibilidade	[um/g]
$A_{RMS}$	Amplitude de vibração em RMS	
$A_{i+T}$	Amplitude de vibração	[um]
$I_0$	Função Bessel do primeiro tipo	
$f_a$	Frequência de amostragem	[Hz]
$f_{max}$	Frequência máxima	[Hz]
$m_c$	Massa de correção	[g]
$m_t$	Massa de teste	[g]
$\ddot{x}$	Aceleração	[m/s <sup>2</sup> ]
$\dot{x}$	Velocidade	[m/s]
$\theta_{Ai}$	Ângulo de fase no estado inicial em relação a referência	[°]
$\theta_c$	Ângulo de correção	[°]
$\theta_T^*$	Ângulo do vetor $T$	[°]
$\Delta V$	Variação da amplitude de vibração	[um]
$\Delta m$	Variação da massa	[g]
A	Amplitude	
C	Amortecimento	[kg/s]
F	Força	[N]
f	Frequência de vibração	[Hz]
HD	Sensor horizontal direito	
HE	Sensor horizontal esquerdo	
K	Constante da mola	[N/m]
N	Número de pontos	
RMS	Root mean square (valor quadrático médio)	
S	Sensibilidade	[g/um]
t	Tempo	[s]
T	Período de vibração	[s]
VD	Sensor vertical direito	
VE	Sensor vertical esquerdo	
$\alpha$	nº real arbitrário e não negativo que determina a forma da janela	
$\theta$	Ângulo de fase	[°]
$\omega$	Frequência angular	[rad/s]
FFT	Transformada rápida de Fourier	



# 1 Introdução

Este trabalho tem como objetivo criar um sistema de monitorização que permita a deteção e o diagnóstico de avarias em sistemas mecânicos rotativos usando o LabView, que é uma linguagem de programação (baseada em fluxo de dados, onde o fluxo de dados determina a execução) gráfica que utiliza ícones, em vez de linhas de texto para criar aplicações.

Existem muitas maneiras de se obter e apresentar dados de vibração para detetar e identificar os problemas específicos em elementos rotativos. Segundo Thomson e Dahleh, 1998, os procedimentos analíticos para o tratamento das equações diferenciais não-lineares são complicados e requerem um estudo matemático mais profundo e, em função disto, novas ferramentas de análise da vibração devem ser desenvolvidas e empregues.

O diagnóstico rápido do defeito e a análise confiável das causas são exigências do mercado atual e há ainda muito neste campo a ser desenvolvido, pois envolve os alicerces da indústria moderna, a alta utilização dos meios de produção aliada aos baixos custos de manutenção, no qual máquinas como compressores, turbinas, motores elétricos, bombas centrífugas e, após a crise energética de 2000-2001, motores e geradores são cada vez mais utilizados no processo produtivo.

## 1.1 Motivação

Tendo em conta a crescente complexidade de sistemas mecânicos, torna-se cada vez mais relevante prevenir e detetar avarias tão precocemente quanto possível, para se evitar danos de maior grau e diminuir os custos de manutenção.

Assim, assumindo uma monitorização controlada e contínua das vibrações, é possível estar um passo adiante de qualquer avaria ou dano que possa vir a surgir, quer por desgaste e fadiga, quer por incorreções na montagem e funcionamento.

A motivação para este trabalho surge precisamente nesse contexto, uma vez que a manutenção representa uma parcela significativa dos custos de uma máquina em todo o seu ciclo de vida útil. Assim, com um programa de manutenção adequado, espera-se reduzir esses custos e poder aumentar significativamente a eficiência de um sistema mecânico.

## 1.2 Contexto

A manutenção ainda encontra um espaço representativo nos custos das grandes corporações industriais e por este motivo é um tema de constante pesquisa para melhorar a sua eficiência e minimizar a sua participação neste quadro, agregando tecnologia de ponta à sua área de atuação.

Segundo Scheffer e Girdhar, 2004, por definição, a manutenção é o ato de manter. Existem diversas estratégias no gerenciamento da manutenção que dependem do grau de importância dos

equipamentos dentro da linha de produção e dos custos envolvidos, tanto na execução dos serviços de manutenção como na substituição dos equipamentos.

De entre as várias definições de manutenção expressas em normas nacionais e internacionais, a norma EN 13306 define a manutenção como sendo a combinação de todas as ações técnicas, administrativas e de gestão durante o ciclo de vida de um bem, destinadas a mantê-lo ou repô-lo num estado em que possa desempenhar a função requerida.

Segundo Scheffer e Girdhar, 2004 é possível de entre inúmeras possibilidades de tipos de manutenção, dividir em três principais filosofias:

- **Manutenção corretiva:** segundo a norma EN 13306 este é um tipo de manutenção efetuado depois da deteção de uma avaria. Assume o funcionamento do equipamento até ao ponto em que apresenta uma falha, e só depois é realizada a reparação ou substituição do componente danificado.

Tem como desvantagens a redução da produção devido aos tempos de reparação, dos custos do material e dos técnicos; colocar os responsáveis pela manutenção num estado de incerteza e de desorganização pois quando é descoberta a avaria a equipa tem que reagir de imediato; devido à imprevisibilidade da avaria requer também que se disponha de uma larga quantidade de peças de reposição, por forma a tentar reduzir os custos; os responsáveis procuram obter as peças de substituição a um preço mais baixo, e portanto, com menor qualidade e ter pessoal menos qualificado para as reparações.

É nitidamente a filosofia menos vantajosa, e mesmo assim, continua a ser comum, em fábricas;

- **Manutenção preventiva sistemática:** segundo a norma EN 13306 este é um tipo de manutenção efetuado em intervalos de tempo predeterminados ou com a finalidade de reduzir a probabilidade de avaria ou de degradação do funcionamento de um bem.

A manutenção preventiva, tal como o nome indica, tem como base prevenir avarias. As operações de manutenção são programadas e calendarizadas com intervalos de tempo predeterminados (pelos fornecedores ou pelos engenheiros responsáveis), baseadas geralmente no número de horas de funcionamento dos equipamentos. A reparação ou substituição dos componentes ou equipamentos presumivelmente danificados é realizada antes de ocorrer sintomas demasiado perceptíveis.

Esta metodologia tem vantagem para equipamentos que não estejam continuamente em atividade e quando os técnicos têm qualificações suficientes e tempo disponível para realizar os trabalhos de manutenção.

E tem como desvantagens o fato da manutenção previamente agendada poder resultar em intervenções de manutenção demasiado cedo ou já muito tarde, o fato de parar o funcionamento dos equipamentos para as revisões datadas, as reparações ou substituições serem efetuadas mesmo que não sejam detetadas quaisquer anomalias quer com os componentes do equipamento quer no seu funcionamento, implicando paragens desnecessárias e desaproveitamento de vida útil dos componentes, ou ainda incorretas operações de reparação.

- **Manutenção preventiva condicionada:** segundo a norma EN13306 este é um tipo de manutenção condicionada efetuada de acordo com as previsões extrapoladas da análise e da avaliação de parâmetros significativos da degradação do equipamento.

São programadas intervenções de manutenção quando são detetadas falhas funcionais em alguma parte do equipamento em análise. As condições da máquina são periodicamente monitorizadas, seguindo também um agendamento, mas mais curto por serem operações

de monitorização que não implicam a paragem do equipamento, e quando surge algum sintoma de problemas mecânicos ou operacionais, é então identificada a origem do problema e agendada convenientemente uma intervenção para se proceder à resolução do problema.

A grande vantagem de optar por uma filosofia de manutenção condicionada, é que a gestão feita sobre a manutenção pode ser programada de forma ordenada e controlada. Pode-se organizar por grau de severidade do problema, mas ainda precocemente, dando tempo e espaço de manobra para adquirir as peças de substituição adequadas e reduzindo a quantidade de peças de reserva em armazém. Uma vez que as reparações só são feitas quando realmente são fundamentais, a capacidade produtiva tende a aumentar.

Tem como desvantagens deste método está no fato de haver possibilidade de ser exigido muito mais tempo e verbas de capital para as operações de manutenção, se for feita uma incorreta avaliação do estado operacional e deterioração do equipamento, no fato de ser fundamental ter pessoal especializado para efetuar estas avaliações acompanhados também por instrumentos de monitorização específicos e necessários para adquirir dados suficientes para avaliar o estado da máquina.

A manutenção baseada na condição (CBM – Condition Based Maintenance), tem assim como objetivo, monitorizar condições mecânicas, eficiências dos equipamentos e outros parâmetros que sejam fundamentais para o bom funcionamento da máquina, chegando o mais próximo possível ao ponto de decisão de reparar ou não, funcionando um pouco em analogia com diagnósticos médicos.

Tem como vantagens reduzir significativamente os custos e as paragens não programadas, reduzir o número de stock de peças e minimizar as paragens abrutadas.

## 1.3 Estrutura da dissertação

### Capítulo 1:

#### **Introdução**

Apresentação do tema e do seu contexto, bem como a motivação e os objetivos a atingir.

Uma breve introdução sobre a manutenção e a sua evolução, explicitando as principais filosofias de manutenção, dando maior foco à manutenção baseada na condição. A análise de vibração como ferramenta da manutenção baseada na condição. Breve introdução dos defeitos típicos em equipamentos rotativos, sobre a transformada rápida de Fourier (FFT) que é a ferramenta mais utilizada no processamento de sinal no que diz respeito à análise de vibrações e sobre aquisição de dados.

### Capítulo 2:

#### **Vibrações em elementos rotativos**

Apresentação do conceito básico de vibração. Introdução da análise espectral, abordando a FFT, bem como as configurações para uma correta análise espectral, como o tipo de janela, a largura de banda através da frequência máxima e das linhas de resolução, o fenómeno de aliasing, as médias de janelas de dados, a percentagem de sobreposição aplicada às janelas de aquisição, e as grandezas e amplitudes de vibração.

Apresentação e explicação do sistema desenvolvido para simular sinais em domínio temporal, o espetro de frequência e a evolução do nível global de um sinal com os respetivos limites de velocidade de acordo com a Norma ISO 10816 – parte 3 que diz respeito à avaliação da vibração mecânica por medições em partes não rotativas.

### Capítulo 3:

#### **Caso de estudo experimental**

Explicação sobre os procedimentos de montagem dos acelerómetros e sistema de aquisição, construção dos suportes para os acelerómetros, até o processo de equilibragem multiponto. Explicação do funcionamento do modelo desenvolvido para adquirir dados com o equipamento em funcionamento que é ligado por fios ao modelo de simulação tornando uma só aplicação para adquirir ou simular.

Criação de uma terceira aplicação isolada apenas para a equilibragem devido a alterações no tipo de filtro a usar para obter o sinal no tempo à frequência de rotação.

Equilibragem multiponto usando toda a informação dos quatro sensores.

### Capítulo 4:

#### **Conclusões**

Conclusões finais em matérias importantes salientando as contribuições propostas e apresentando sugestões para projetos futuros.

## **1.4 Manutenção baseada na condição**

No âmbito da implementação da manutenção baseada na condição usando análise de vibração mecânica, de um modo geral, o planeamento da implementação desta técnica deve ser iniciado com o domínio da tecnologia e acompanhamento de máquinas consideradas críticas para o processo produtivo.

Em termos económicos, de uma maneira geral, a aplicação de programas de Manutenção baseada na condição em indústrias de processo resulta em reduções da ordem de:

- 2/3 nos prejuízos com paragens inesperadas de produção;
- 1/3 nos gastos com a manutenção.

Resumindo, a manutenção baseada na condição tem como objetivo minimizar a ocorrência de avarias nos equipamentos através da monitorização das condições de operação destas máquinas, detetar os problemas ainda numa fase inicial, prever qual a vida útil remanescente e programar as reparações necessárias, antes que a avaria cause uma interrupção do funcionamento da máquina.

## **1.5 Identificação da Origem das Vibrações**

A análise de vibrações é uma ferramenta poderosa de diagnóstico de problemas em máquinas. Já é sabido que existem muitas maneiras de se obterem os dados de vibração e apresentá-los para detetar e identificar os problemas específicos em máquinas rotativas.

De acordo com Bloch e Geitner, 2012, o procedimento de obter e apresentar as amplitudes de vibração para todas as frequências presentes, talvez seja a mais útil de todas as técnicas de análise. Estima-se que 85% dos problemas que ocorrem em máquinas rotativas possam ser identificados a partir da análise no domínio da frequência.

Segundo Vance, 1988, as frequências presentes no sinal de vibração medido constituem algumas das informações mais úteis obtidas para diagnosticar problemas da dinâmica da rotação.

As exigências que a indústria moderna impõe às máquinas rotativas e equipamentos de produção, como motores elétricos, geradores, compressores, turbinas, exaustores, ventiladores, etc, devem

ser satisfeitas apesar do aumento da velocidade de rotação. Estas exigências são cada vez mais rigorosas quanto aos níveis de vibração, os quais devem ser cada vez menores.

Deste modo, de acordo com Scheffer e Girdhar, 2004, descreve-se a seguir alguns tipos de avarias mais comuns em máquinas rotativas: desequilíbrio, eixo dobrado, desalinhamento, problemas com a correia, defeitos de engrenagem, defeitos de rolamento de elementos rolantes e de elementos deslizantes.

### 1.5.1 Desequilíbrio

Ocorre quando o centro de massa de um sistema rotativo não coincide com o centro geométrico. O desequilíbrio é um problema que aparece sempre em qualquer elemento rotativo, com maior ou menor intensidade. Como existe o problema da dilatação térmica, um eixo e sua chumaceira devem ter, necessariamente, um ajuste ou folga, destinado à lubrificação. Com isso os centros das duas peças dificilmente coincidirão, havendo sempre uma pequena diferença. Portanto o desequilíbrio sempre existirá mesmo utilizando materiais homogêneos e maquinagem de precisão. Assume uma vibração bem determinada com componente predominante na direção radial, e manifesta-se só à frequência de rotação do rotor, ou seja, 1RPM.

A Figura 1 ilustra um exemplo do espectro do desequilíbrio.

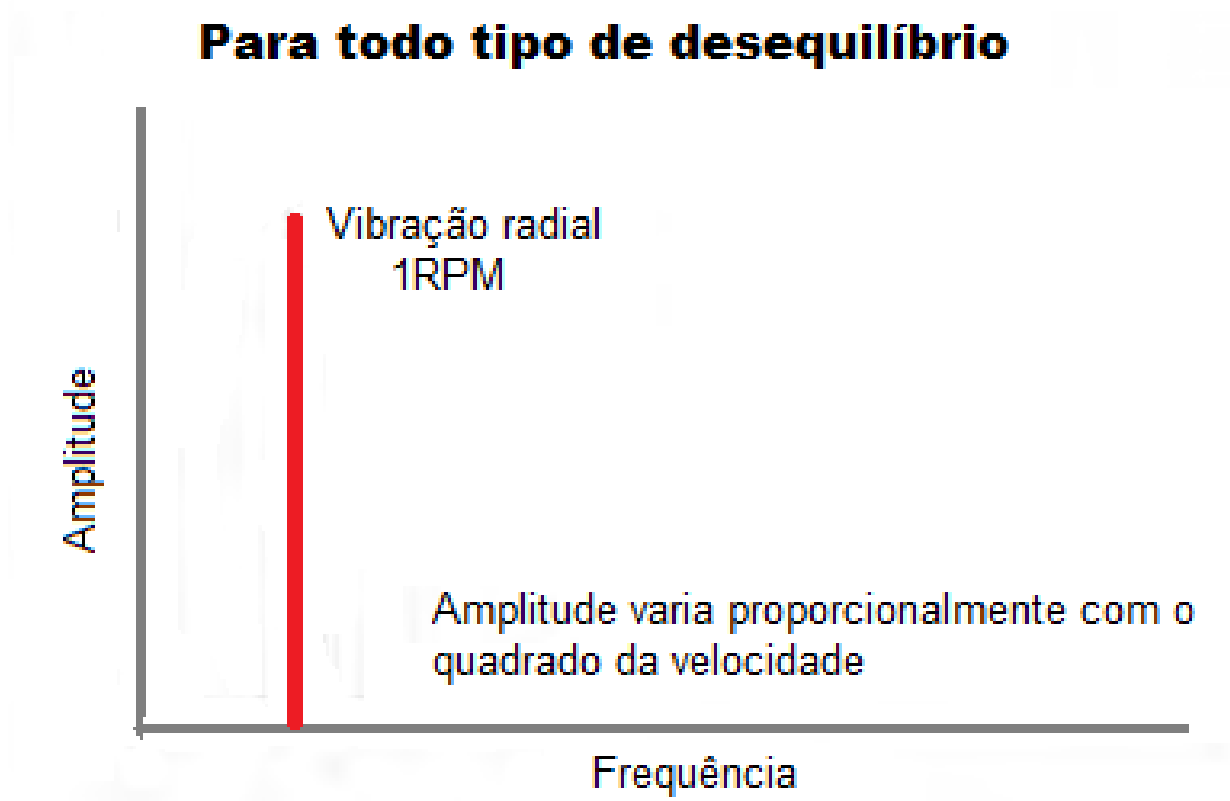


Figura 1 - Espectro do Desequilíbrio (adaptado de Scheffer e Girdhar, 2004)

Tem-se como principais causas do desequilíbrio:

- Assimetria entre o eixo de rotação e o eixo principal de inércia;
- Não-homogeneidade do material;
- Excentricidade;

- Assimetria entre o rolamento e o veio.
- Desequilíbrio hidráulico ou aerodinâmico.
- Adição de massa de forma não homogénea devido a adesão de lixo, pó ou detritos na fase de exploração ou utilização do equipamento.
- Diminuição de massa de forma não homogénea devido ao desgaste ou deterioração do rotor.

A ação de eliminar o desequilíbrio em sistemas rotativos é denominada equilibragem, que será tratada no capítulo 3.

### 1.5.2 Eixo empenado

Quando existe um eixo dobrado, as vibrações tanto na direção radial quanto na direção axial são elevadas, e as vibrações axiais podem ser superiores às vibrações radiais. A FFT normalmente terá componentes de 1RPM e 2RPM.

Se a amplitude de 1RPM é dominante, então a curva está próxima do centro do eixo. Se a amplitude de 2RPM é dominante, então a curva está próxima da extremidade do eixo.

A Figura 2 ilustra um exemplo do espectro de um veio dobrado.

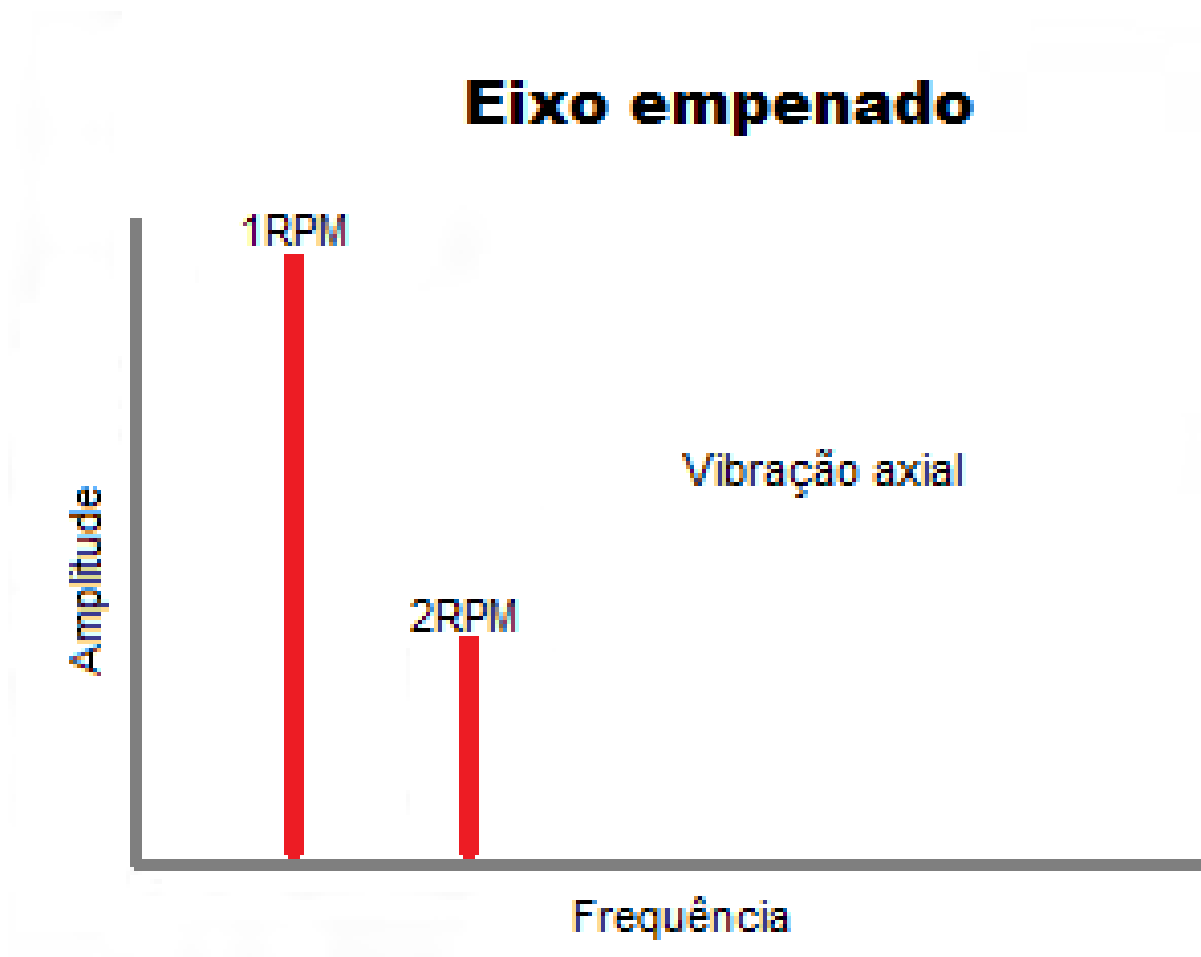


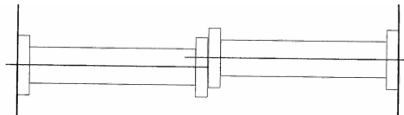
Figura 2 - Espectro do veio empenado (adaptado de Scheffer e Girdhar, 2004)

### 1.5.3 Desalinhamento

Assim como o desequilíbrio o desalinhamento dá origem a vibrações. No caso do desequilíbrio a frequência da vibração coincide com a rotação do rotor, mas, no caso do desalinhamento, pode aparecer outra frequência igual ao dobro ou triplo da velocidade de rotação. Assume uma vibração axial de elevada amplitude, as componentes predominam em 2RPM, e podem estar acompanhadas em simultâneo por harmónicas de ordem 1RPM e 3RPM.

De um modo geral, existem três tipos de desalinhamento:

1. **Desalinhamento Paralelo:** verifica-se frequências de rotação e do dobro da rotação do eixo, a amplitude se propaga no plano radial;



A Figura 3 ilustra um exemplo do espectro do desalinhamento paralelo.

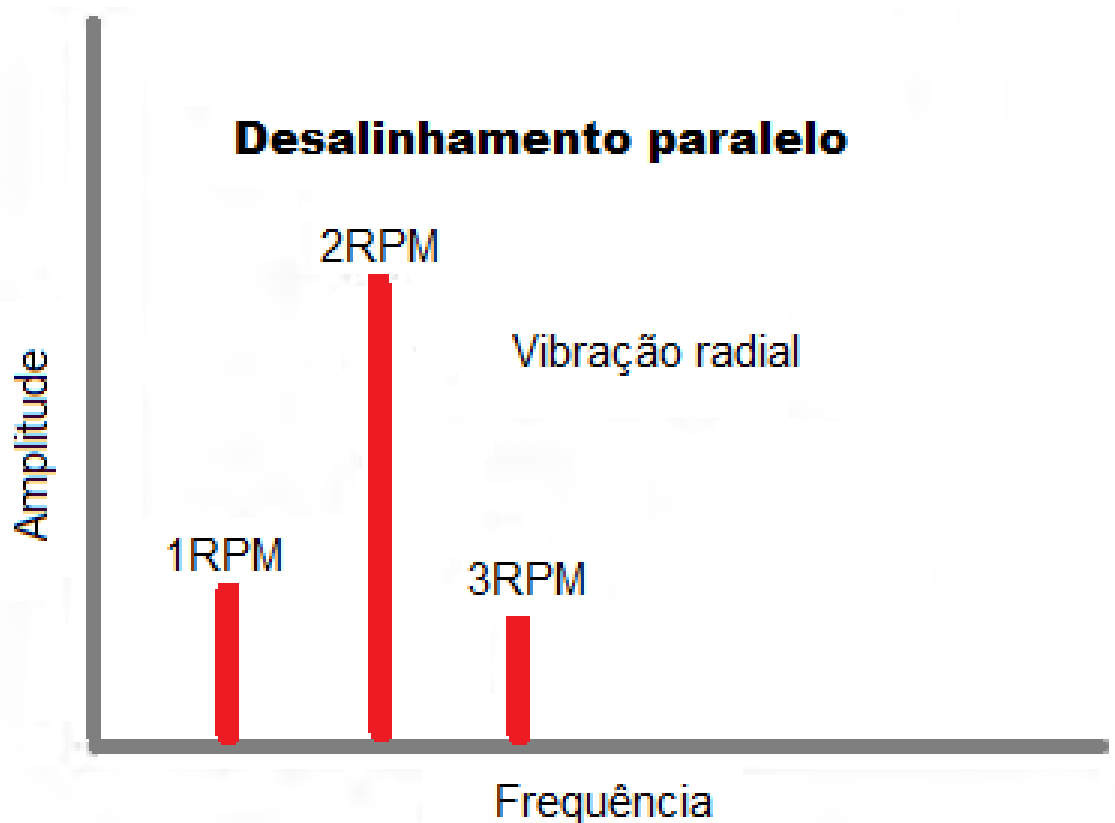
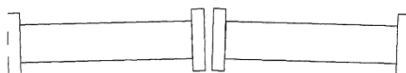


Figura 3 - Espectro do Desalinhamento paralelo (adaptado de Scheffer e Girdhar, 2004)

2. **Desalinhamento Angular:** verifica-se frequências correspondentes a uma vez e duas vezes a rotação do eixo, vibração dominante no plano axial;



A Figura 4 ilustra um exemplo do espectro do desalinhamento angular.

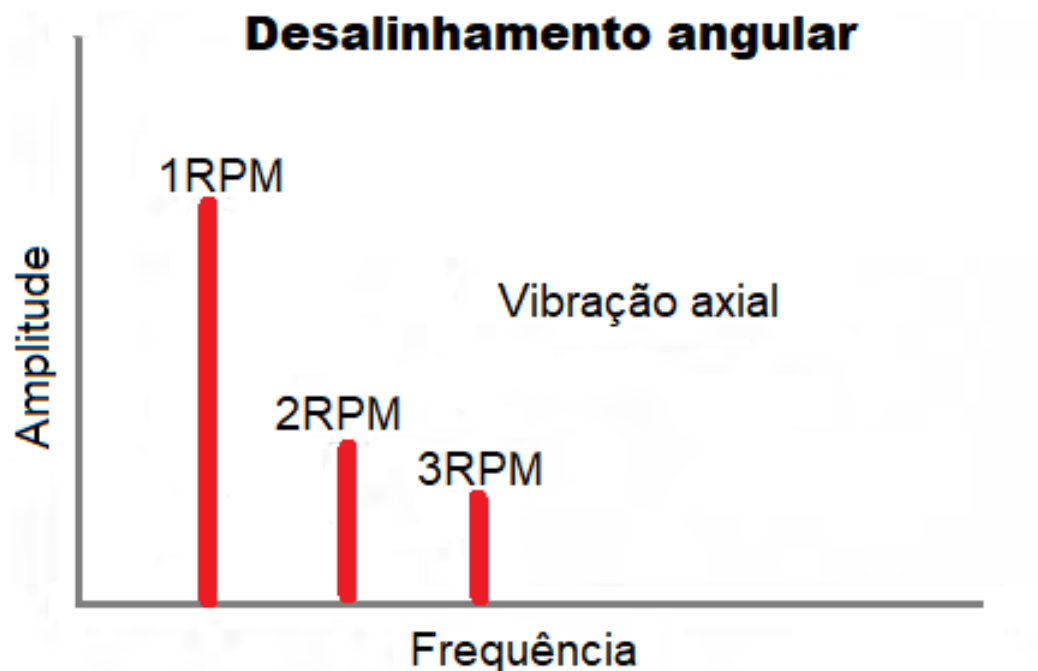
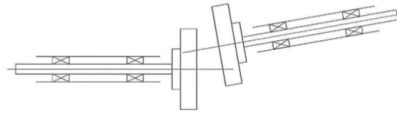


Figura 4 - Espectro do Desalinhamento angular (adaptado de Scheffer e Girdhar, 2004)

3. **Desalinhamento combinado:** além da vibração predominante acontecer na direção axial, ocorre uma vibração significativa na direção radial;



O desalinhamento pode ser causado por erros de montagem, movimento de fundações, dilatação térmica, deformação da estrutura ou travagem do acoplamento.

### 1.5.4 Folgas

Toda a vez que duas peças mecânicas deslizam entre si, há necessidade de uma diferença de dimensões, diferença conhecida como ajuste, destinado a manter uma película de lubrificante entre as peças deslizantes. Com o uso, tal ajuste aumenta além do necessário, passando a constituir uma folga. A folga aparece comumente nas chumaceiras de metal branco e não só. Neste sentido, é importante sua detecção para evitar prejuízos.

Têm-se as seguintes características:

- Folgas estruturais: verifica-se frequências iguais a uma, duas ou três vezes a rotação do eixo, sendo esta última predominante. Ocasionalmente pode-se encontrar frequências da ordem de dez vezes a rotação do eixo. A vibração se dá predominantemente no plano radial;
- Folgas de elementos rotativos: verifica-se frequência dominante igual à rotação do eixo, com pequenas amplitudes. A vibração se dá predominantemente no plano radial. As folgas podem aparecer somente em certas condições de carga e temperatura, ou a partir de impulsos transitórios no funcionamento da máquina.

As folgas podem ser causadas por erros de montagem, desgaste excessivo, danos na fundação ou na base, fissuras ou rotura de componentes de fixação.

### 1.5.5 Defeitos em chumaceiras de Rolamento

As principais causas de defeitos em chumaceiras de rolamentos é a seleção incorreta dos rolamentos, sobrecarga, desalinhamento, armazenamento inadequado, lubrificação inadequada e principalmente montagem incorreta. Os defeitos nos rolamentos podem ser previstos através da análise de vibrações, detetando-se componentes espectrais com frequências características dos defeitos e suas harmônicas e bandas laterais (estas frequências podem ser calculadas em função da geometria do rolamento).

Podem ocorrer defeitos em qualquer uma das partes do rolamento e causarão alta frequência.

As frequências de defeito do rolamento não são integralmente harmônicas para a velocidade de funcionamento.

O espectro de frequências para defeitos de rolamento pode ser dividido em quatro zonas (A, B, C e D), onde, segundo Sheffer e Girdhar, 2004, nas zonas B, C e D, verificam-se mudanças à medida que o desgaste do rolamento progride. Essas zonas são descritas como:

Zona A: RPM da máquina e zona harmônica

Zona B: zona de frequência de defeito do rolamento (5-30 kCPM)

Zona C: zona de frequência natural do componente do rolamento (30-120 kCPM)

Zona D: zona de detecção de alta frequência (HFD) (além de 120 kCPM).

A figura Figura 5 ilustra um exemplo do espectro de defeito em chumaceiras de rolamento.

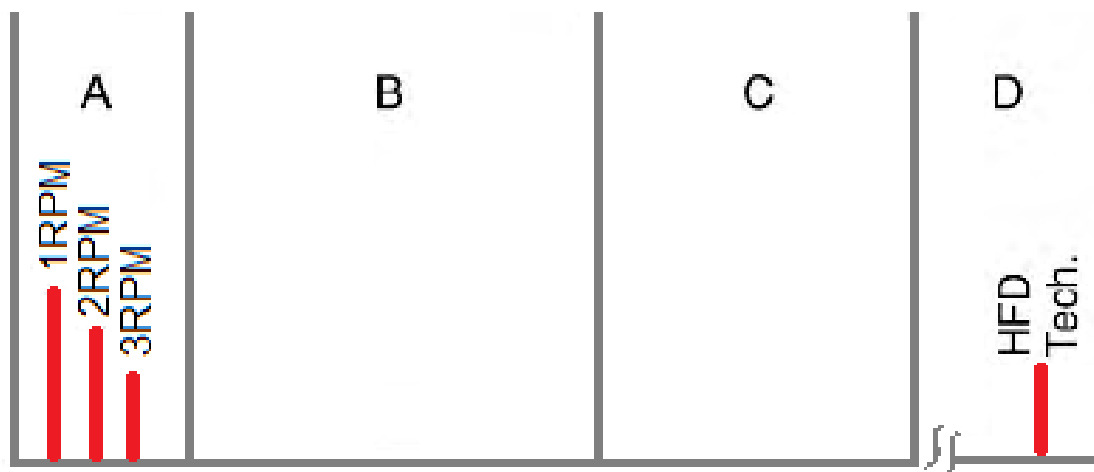


Figura 5 - Espectro de defeitos em rolamentos de elementos rolantes (adaptado de Scheffer e Girdhar, 2004)

### 1.5.6 Defeitos em polias e correias

Os principais motivos pelos quais equipamentos acionados por polias e correias de transmissão vibram são: montagem inadequada da correia na polia, mau acabamento das polias, desalinhamento das polias, tensão inadequada, excentricidade e desalinhamento.

As frequências de defeito da correia são do tipo sub harmônico. Ao analisar as correias, é necessário manter a frequência máxima baixa para poder notar estes picos. Quando as correias

não são novas, soltas ou incompatíveis, elas podem gerar harmônicas da frequência da correia. É possível obter 3RPM ou 4RPM da frequência da correia, e muitas vezes, a frequência da correia 2RPM é dominante.

As amplitudes normalmente são instáveis, às vezes pulsando com o condutor ou conduzido. Em relação às correias dentadas, é útil saber que quando em altas amplitudes indica desalinhamento da correia ou da polia.

A Figura 6 ilustra um exemplo do espectro de defeitos em polias e correias.

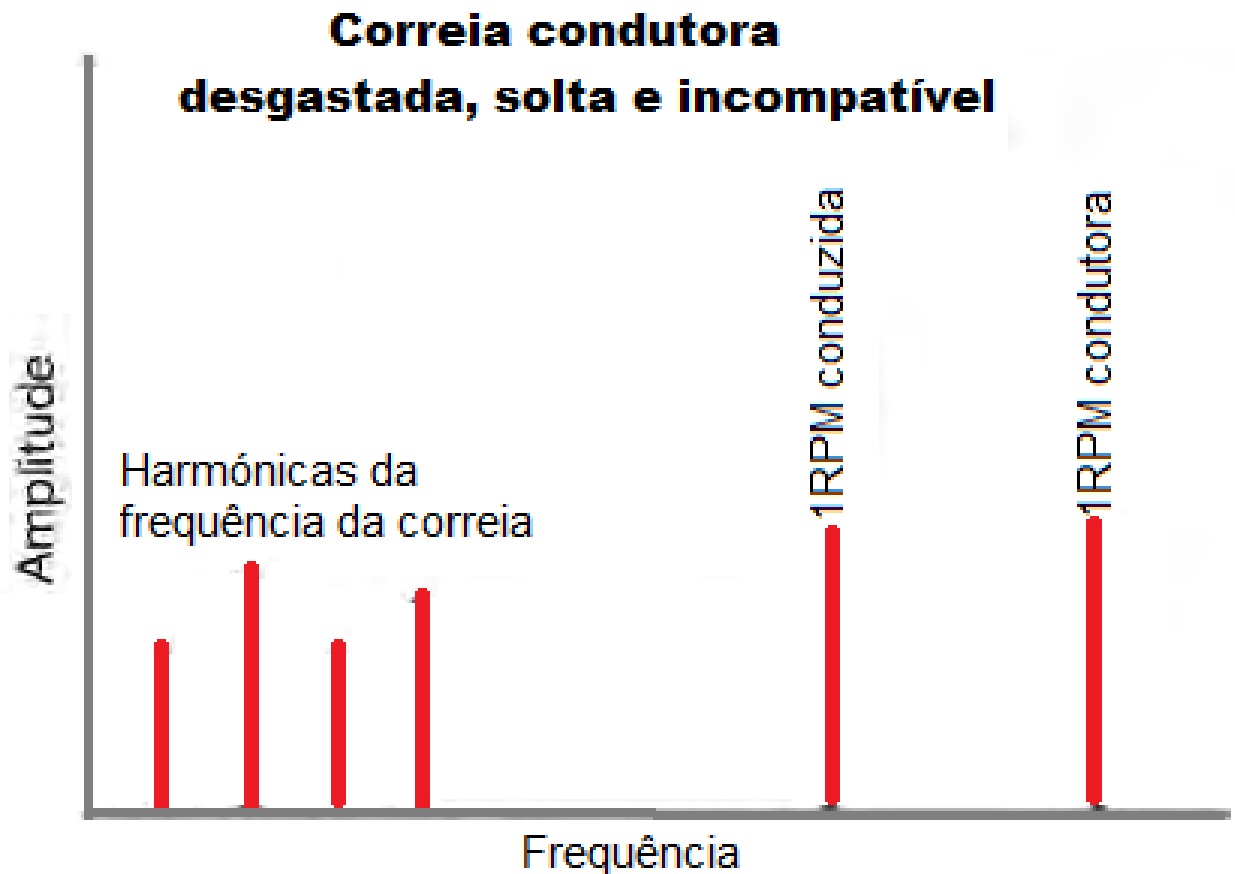


Figura 6 - Espectro de defeitos em polias e correias (adaptado de Scheffer e Girdhar, 2004)

### 1.5.7 Defeitos em chumaceiras de escorregamento

Normalmente constituídas por peças de aço, recobertas com ligas especiais, também conhecidos por "babbit" ou "metal branco". O problema nestes casos centra-se no seu desgaste. Chumaceiras de escorregamento podem apresentar várias avarias, incluindo folgas e instabilidade dinâmica. Esses problemas podem ser causados por montagem incorreta, folga excessiva, desgaste, lubrificação incorreta, carga radial ou projeto inadequado.

Os estágios tardios do desgaste do rolamento de periódico normalmente exibem toda uma série de harmônicos de velocidade, que podem ser até 10RPM ou 20RPM. O espectro da FFT é muito parecido com o de perdas mecânicas.

A Figura 7 ilustra um exemplo do espectro de defeitos em chumaceiras de escorregamento.

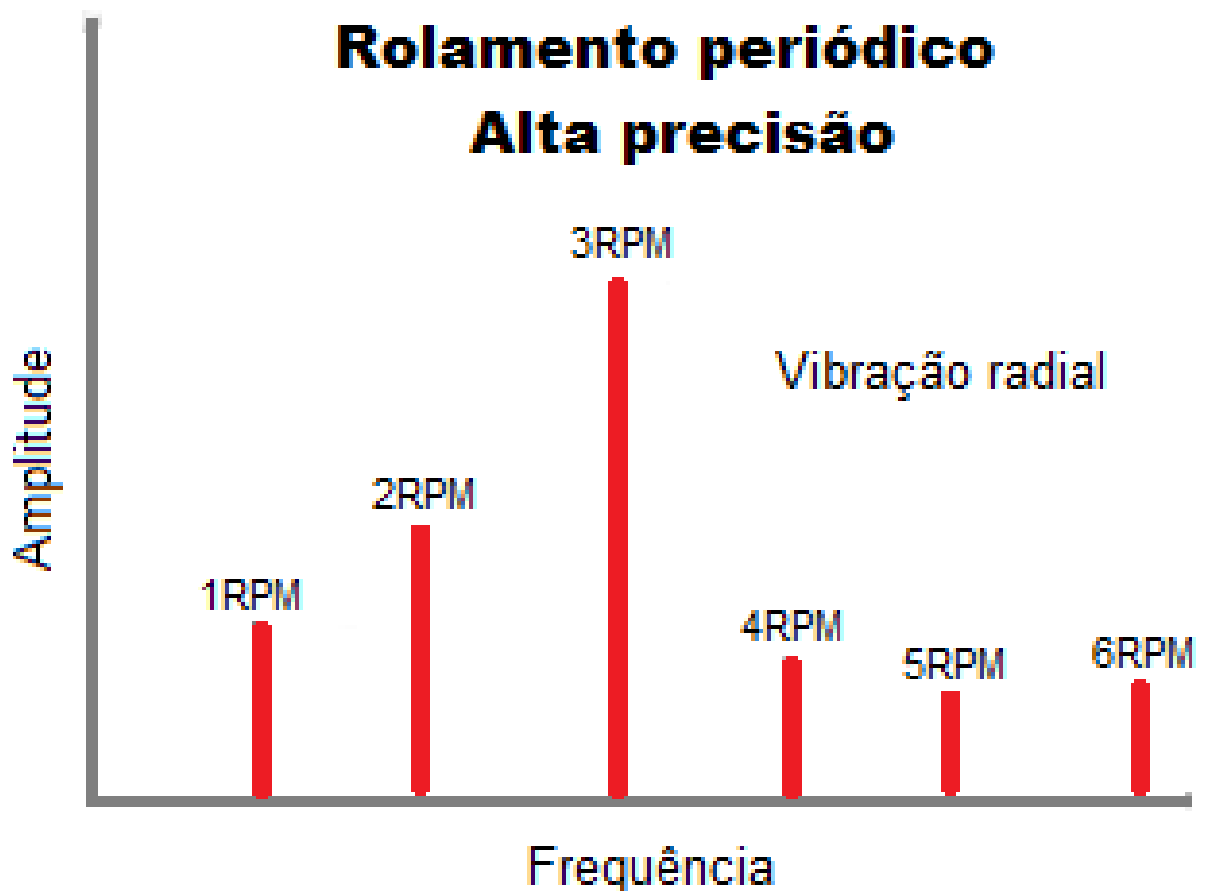


Figura 7 - Espectro de defeitos em rolamentos periódicos (adaptado de Scheffer e Girdhar, 2004)

### 1.5.8 Defeitos em Engrenagens

As engrenagens podem apresentar defeitos semelhantes aos de outras máquinas, como desalinhamento, desequilíbrio, folgas, porém podem apresentar defeitos específicos que se manifestam de forma característica no espectro de vibração: deformação no círculo primitivo, irregularidades de passo e da forma dos dentes e excentricidade. Esses defeitos podem ser causados por erros de maquinagem, montagem ou ajuste incorretos, desgaste excessivo, lubrificação inadequada, contaminação, desalinhamento, fadiga ou sobrecarga. Mesmo engrenagens em boas condições de uso, apresentam bandas laterais em torno da componente na frequência de engrenamento e seus múltiplos, devido às não-uniformidades inerentes ao engrenamento, como: excentricidade das engrenagens e irregularidades na geometria dos dentes.

O espectro de qualquer caixa de velocidades mostra as rotações de 1RPM e 2RPM, juntamente com a frequência da malha de engrenagem (GMF). O GMF é calculado pelo produto do número de dentes de um pinhão ou de uma engrenagem, e sua respectiva velocidade de corrida:  $GMF = \text{número de dentes no pinhão} \times \text{rotações do pinhão}$ .

O GMF terá bandas laterais de velocidade de rolamento em relação à velocidade do eixo a que a engrenagem está ligada. Os espectros da caixa de velocidades contêm uma gama de frequências devido aos diferentes GMF's e seus harmônicos. Todos os picos têm baixas amplitudes e nenhuma frequência de engrenagem natural é excitado se a caixa de velocidades ainda estiver em boas condições. Bandas laterais ao redor do GMF e sua os harmônicos são bastante comuns. Estes contêm informações sobre falhas da caixa de velocidades.

O desgaste e a folga do dente podem excitar as frequências naturais da engrenagem junto com a engrenagem frequências e suas bandas laterais. A análise do aprimoramento do sinal permite a coleta de vibrações de um único eixo dentro de uma caixa de velocidades.

A Figura 8 ilustra um exemplo do espectro de defeitos em engrenagens.

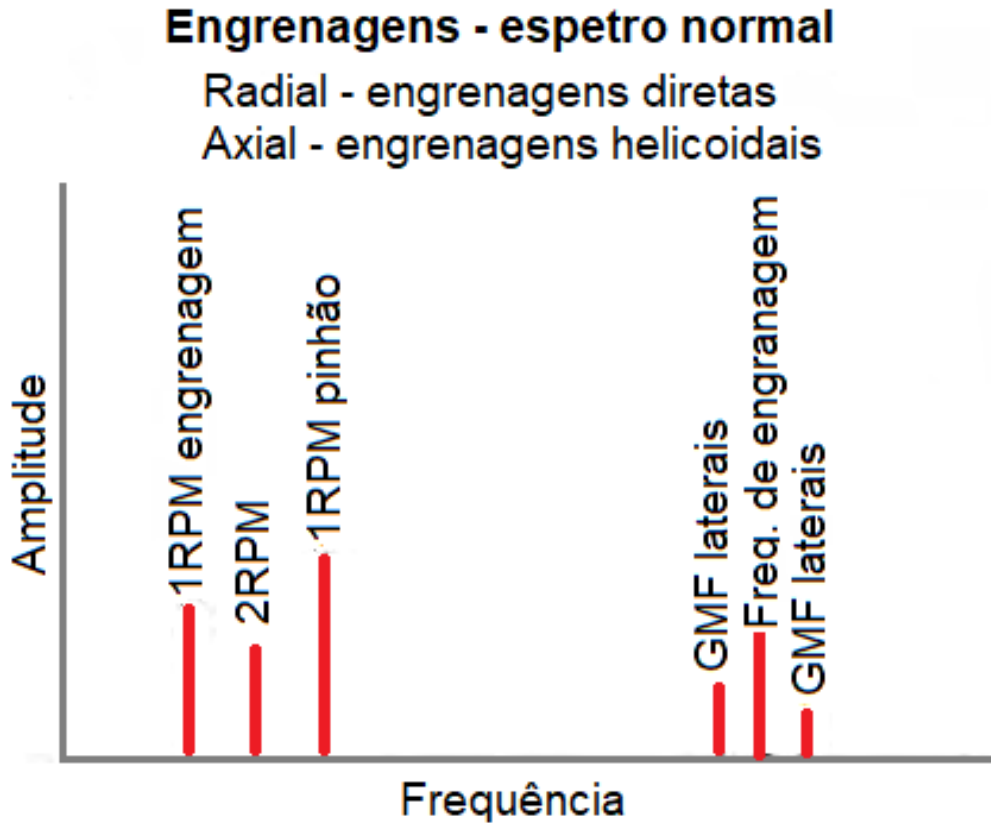


Figura 8 - Espectro do defeito de engrenagens (adaptado de Scheffer e Girdhar, 2004)

## 1.6 Implementação computacional

A ferramenta a utilizar para a implementação computacional do sistema de monitorização será o LabVIEW.

O LabVIEW (acrónimo para Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) é uma linguagem de programação gráfica originária da empresa National Instruments. A programação é feita de acordo com o modelo de fluxo de dados, o que oferece a esta linguagem vantagens para a aquisição de dados e para a sua manipulação.

Os programas em LabVIEW são chamados de instrumentos virtuais ou, simplesmente, VIs. São compostos pelo painel frontal, que contém a interface, e pelo diagrama de blocos, que contém o código gráfico do programa. A linguagem gráfica do LabVIEW é chamada "G".

A Figura 9 ilustra a programação ou diagrama de blocos de um VI no software LabVIEW.

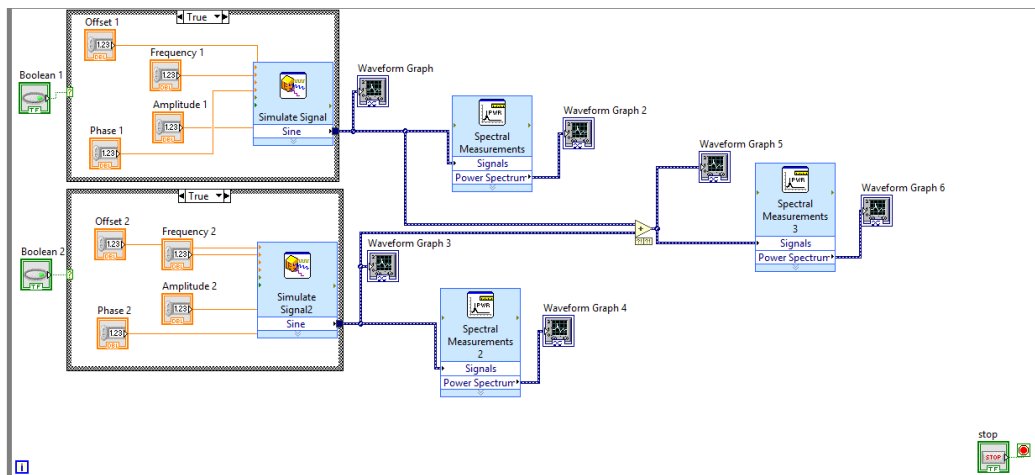


Figura 9- Ilustração de uma VI programada em LabView (block diagram.)

O painel frontal correspondente ao diagrama de bloco da Figura 9 apresenta os gráficos na Figura 10.

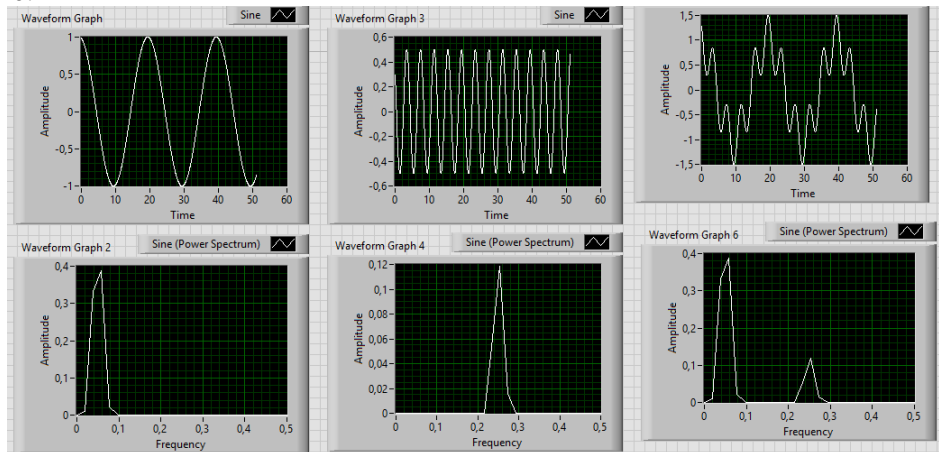


Figura 10- Ilustração de uma VI programada em LabView (front painel)

Aquisição de dados, em informática, corresponde à recolha de informação do mundo real por forma a gerar dados que podem ser manipulados por um computador. Para que os sinais provenientes de um sistema possam ser processados por um computador é necessária a conversão dos sinais analógicos para digitais. O dispositivo responsável por esse processo é a placa de aquisição de dados com conversor analógico-digital, que também é, na maioria dos casos, responsável pelo processo inverso, ou seja, transformar sinais provenientes do computador em um dado analógico. Um sinal é uma função de uma variável ou uma soma de várias variáveis. As variáveis ou parâmetros processuais podem ser o tempo, uma grandeza dimensional, etc. O sinal contém informações acerca de uma determinada grandeza, quer seja uma grandeza natural, como força, velocidade, temperatura, etc. Para serem utilizados, os sinais são processados. O processamento de sinais serve para transformá-los em formas que facilitem sua utilização. Para que dados de natureza analógica possam ser utilizados em dispositivos digitais é necessário converter esses dados em um sinal digital, para tal, utiliza-se o conversor analógico-digital (Analog to Digital Converter). E para transformar um sinal digital proveniente de algum dispositivo eletrônico em um sinal analógico faz-se o processo contrário, usando um conversor digital-analógico (Digital to Analog Converter - DAC). Na conversão analógico-

digital o sinal contínuo precisa ser discretizado, ou seja, o sinal possui valores que devem ser considerados apenas em determinados instantes de tempo.

Fenômenos periódicos ocorrem com frequência quando se fala de motores, máquinas rotativas, ondas de som, o movimento da terra e o coração em condições normais. De um modo geral, são problemas práticos importantes e podem ser representados por funções periódicas (séries de Fourier).

## 1.7 Série de Fourier

Segundo Jean Baptiste Joseph Fourier, qualquer função periódica, por mais complicada que seja, pode ser decomposta a partir de uma soma de senos e cossenos. Como exemplo apresenta-se o caso de uma função periódica retangular.

$$f(x) = \frac{4k}{\pi} \left( \sin x + \frac{1}{3} \sin 3x + \frac{1}{5} \sin 5x + \dots \right) \quad (1)$$

Esta equação é obtida a partir da soma de três funções sinusoidais que estão representadas na Figura 11 que se segue.

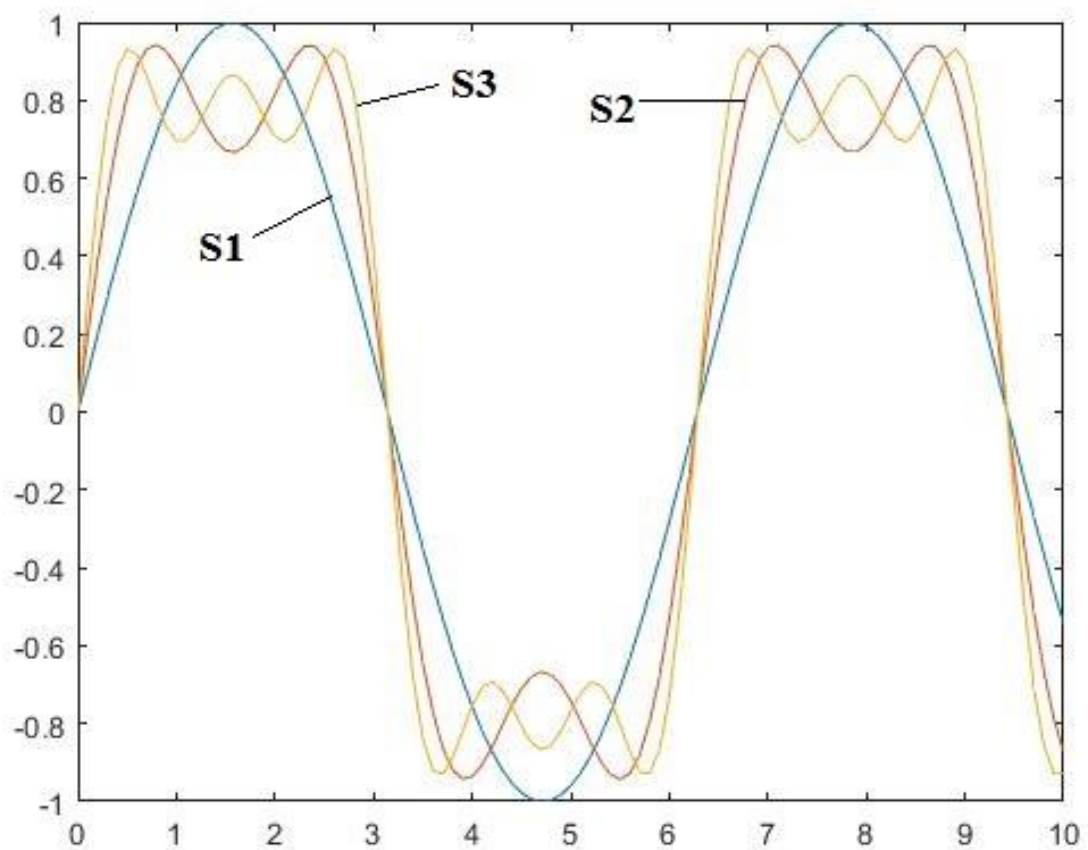


Figura 11 - Exemplo das três primeiras somas parciais de uma série de Fourier, primeira soma parcial (S1), segunda soma parcial (S2) e terceira soma parcial (S3)

### 1.7.1 Transformada de Fourier (FT)

A transformada de Fourier é obtida através da inversão da série de Fourier. E é utilizada para mudar o domínio de uma representação de sinal, pois este é naturalmente representado no domínio do tempo e exibe um grupo de características do sinal. A Figura 12 é uma ilustração de um sinal em domínio temporal.

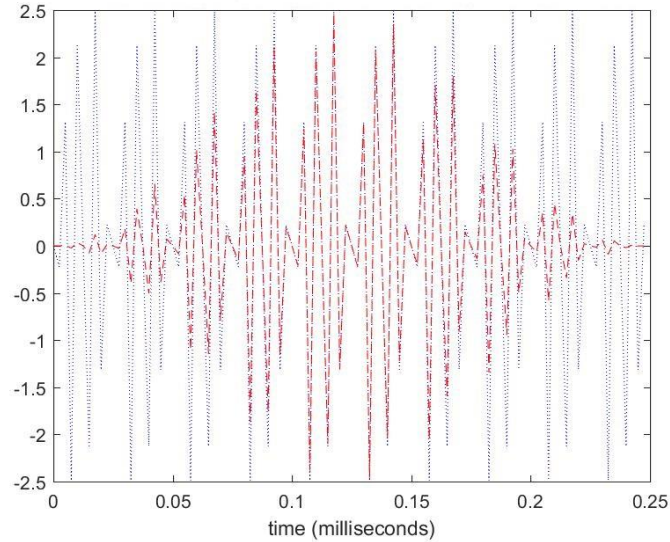


Figura 12 - exemplo de um sinal no domínio do tempo com janela (vermelho) e sem janela (azul)

Para que algumas características do sinal sejam exibidas, é necessário que ele esteja no domínio da frequência (que evidencia as características do sinal). A Figura 13 é o espectro de frequência da Figura 12.

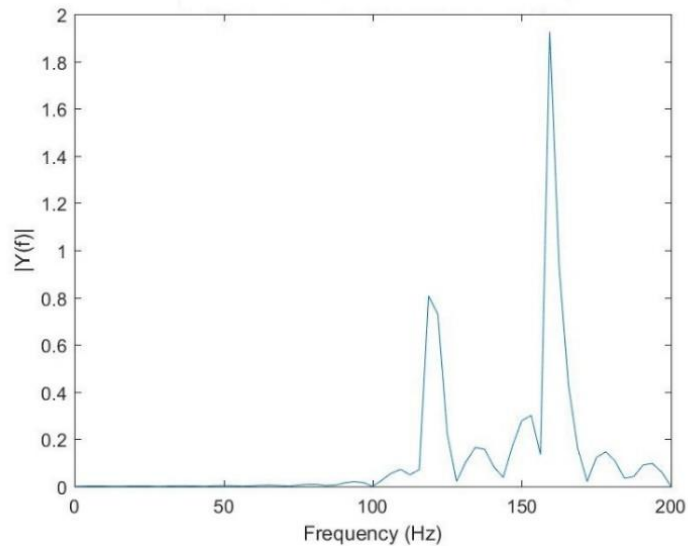


Figura 13 - exemplo de um sinal no domínio da frequência

### 1.7.2 Transformada discreta de Fourier (DFT)

A DFT converte uma sequência finita de amostras igualmente espaçadas de uma função em uma sequência de mesmo comprimento de amostras igualmente espaçadas da transformação de Fourier de tempo discreto (DTFT), que é um valor complexo função de frequência.

### 1.7.3 Transformada Rápida de Fourier (FFT)

A FFT é uma versão mais rápida da DFT, razão pela qual é a forma mais comum de processamento de sinais e foi desenvolvido nos anos 60.

Sendo a DFT de alta complexidade computacional, introduz-se a FFT para aumentar eficiência computacional.

Esta metodologia funciona decompondo um sinal real com variação no tempo, em várias componentes, cada uma contendo uma amplitude, fase e frequência. A amplitude está relacionada com a severidade do problema, assim como a frequência esta relacionada com a causa deste. A transformada permite passar de uma descrição temporal de uns dados valores do sinal para uma descrição em frequência constituída pelos mesmos valores das amplitudes complexas das harmônicas constituintes do sinal.

Como é natural, em aplicações reais os sinais não possuem apenas uma frequência, mas sim componentes em diversas frequências, a visualização gráfica em função do tempo não retém muita informação útil, mas aplicada a transformação, a amplitude de frequência de cada componente irá ter uma notória identificação gráfica, como se demonstra na Figura 14.

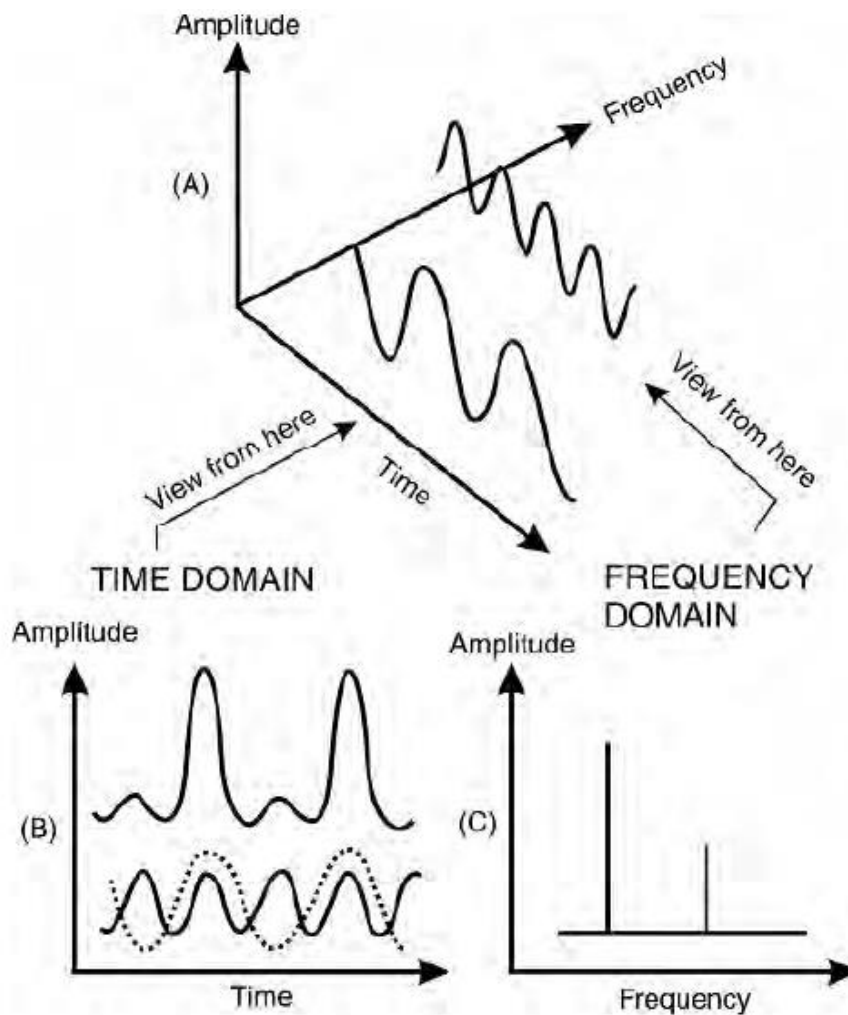
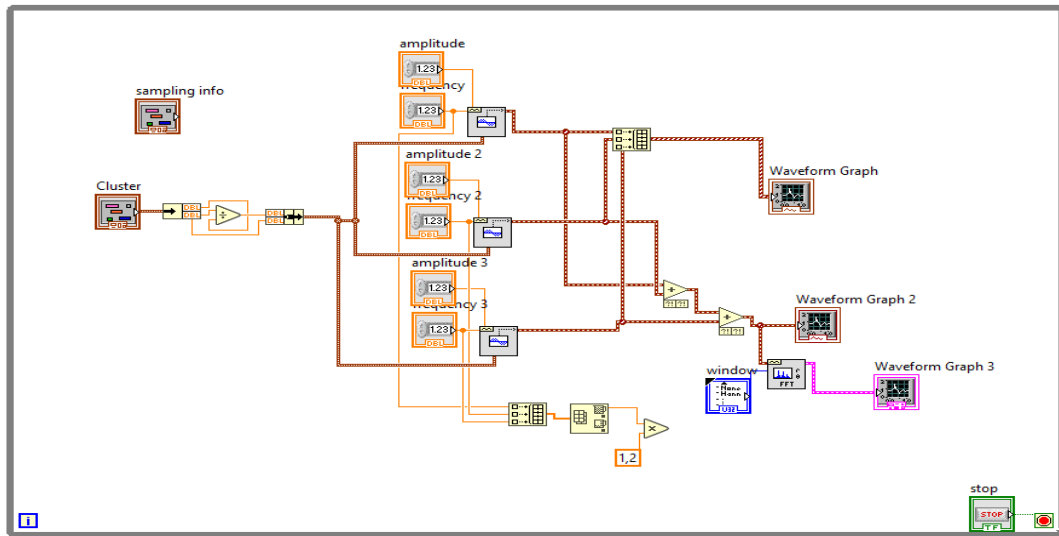
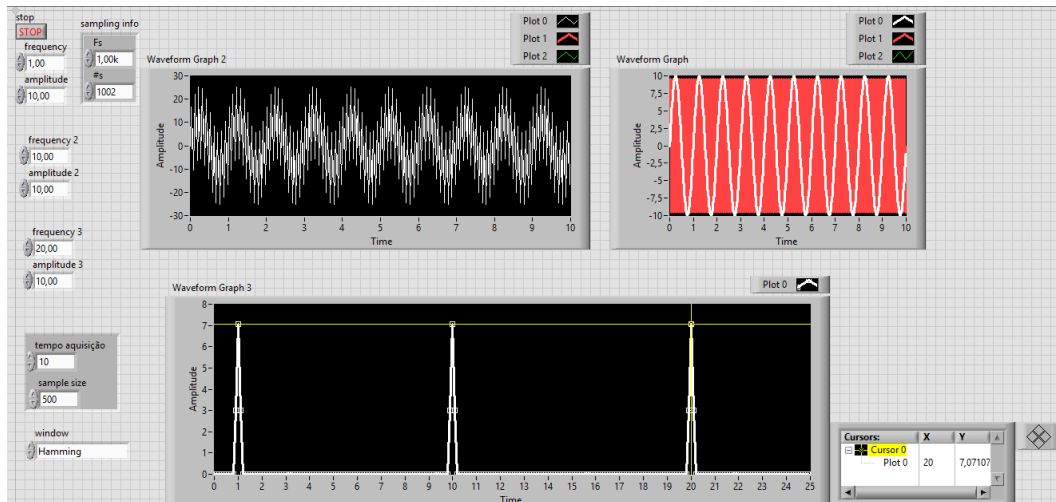


Figura 14 - FFT aplicada a uma máquina (Scheffer e Girdhar, 2004)

Na Figura 15, ilustra-se um outro exemplo de uma FFT. Inicialmente existem três funções sinusoidais, de seguida fez-se a soma dessas funções ainda no domínio do tempo, e por fim a representação dessa soma no domínio da frequência. No domínio da frequência cada curva tem uma representação de uma frequência em toda a largura da banda de frequências.



a)



b)

Figura 15 - Exemplo de uma FFT obtida no LabView

A Figura 15.a) ilustração do diagrama de blocos do exemplo, e a figura Figura 15.b) ilustração do painel frontal do exemplo.



# 2 Vibrações em elementos rotativos

## 2.1 Uma visão geral de análise de vibrações

Segundo Mobley, 1999, a chave para perceber as fontes de vibração é perceber como funcionam as máquinas dinâmicas e como as forças criam uma única vibração.

Quando se fala em perceber como as máquinas dinâmicas funcionam é comum pensar-se que existem muitos e diferentes tipos de máquinas dinâmicas. Mas para clarificar esta questão pode-se lembrar que existe uma característica comum entre todos estes tipos de máquinas. E esta característica é que todas elas são rotativas, e conseqüentemente podem apresentar defeitos característicos tal como já foi dito no capítulo anterior. Estes defeitos podem ser identificados fazendo o controlo do estado de funcionamento do equipamento.

De entre as técnicas de manutenção baseada na condição (análise de vibrações, ultrassons, termografia, tribologia, inspeção visual, e outras técnicas de análise não destrutiva) existentes, que são utilizadas para monitorizar e analisar máquinas críticas, equipamentos e sistemas, a análise de vibrações é a técnica mais dominante quando se fala em gestão de manutenção industrial. A técnica de análise de vibrações permite detetar anomalias ainda numa fase inicial e monitorizar uma falha que se não for identificada com antecedência pode ser fatal para a máquina.

Vibração é o movimento oscilatório de um sistema em torno da sua posição de equilíbrio.

Um sistema mecânico é constituído essencialmente por um meio de armazenamento de energia potencial, representado pela rigidez, um meio de armazenamento de energia cinética definido pela inércia do sistema, e um elemento dissipativo.

Tendo em conta um sistema mecânico, o modelo matemático que descreve o seu comportamento pode ser baseado na resposta forçada considerando uma excitação harmónica,

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = Fe^{j\omega t} \quad (2)$$

onde,  $M$  é a massa do sistema [kg],  $\ddot{x}$  é a aceleração [ $m/s^2$ ],  $C$  é o amortecimento [kg/s],  $\dot{x}$  é a velocidade [ $m/s$ ],  $K$  é a constante da mola [N/m],  $x$  é o deslocamento,  $F$  é a força [N],  $\omega$  é a frequência angular [ $rad/s$ ],  $t$  é o tempo [s].

O inverso do período  $T$  é a frequência  $f$  de vibração, que pode ser expressa em ciclos por segundo (Hz).

Uma função harmónica é a forma mais simples de ilustrar um movimento periódico  $x$ ,

$$x = A \sin(\omega t) \quad (3)$$

onde,  $x$ ,  $A$ ,  $\omega$  e  $t$  são respetivamente dados por deslocamento no domínio do tempo, amplitude da vibração, frequência angular e tempo.

Foi criada em LabView uma aplicação que ilustra este movimento periódico de uma função harmónica a uma frequência  $f = 120\text{Hz}$  (equivalente a um período  $T = 0.0083\text{ s}$  e uma frequência angular  $\omega \cong 754\text{ rad/s}$ ), amplitude  $A = 1\text{ m/s}^2$ , frequência de amostragem  $f_a = 4000\text{Hz}$  e número de pontos  $N = 100$ , ou seja,

$$\ddot{x} = 1 \sin 754t \quad (4)$$

Tal como se ilustra na Figura 16.

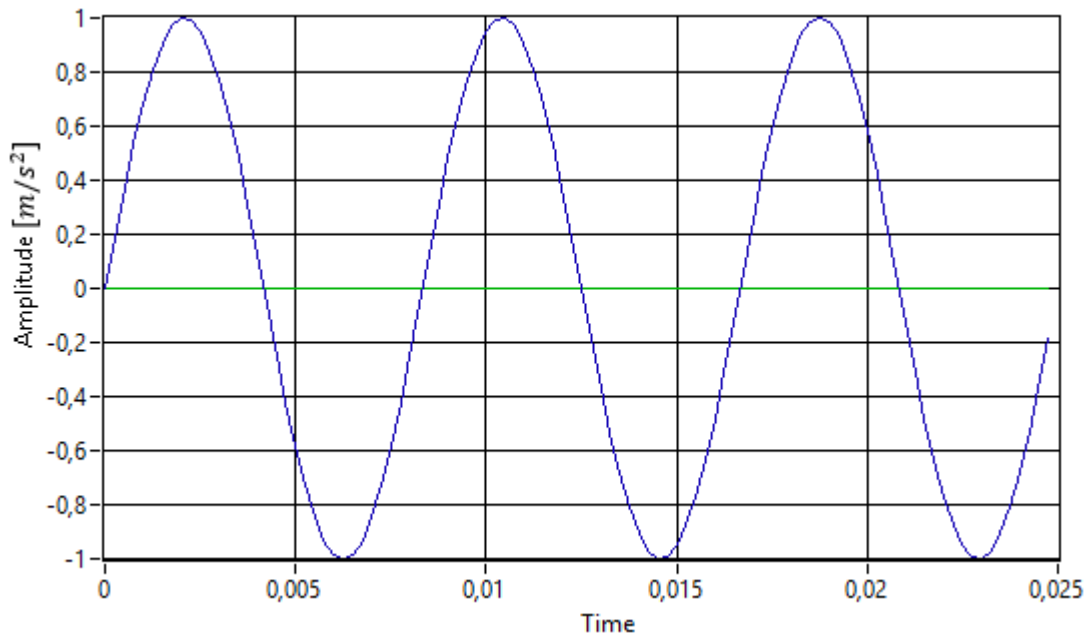


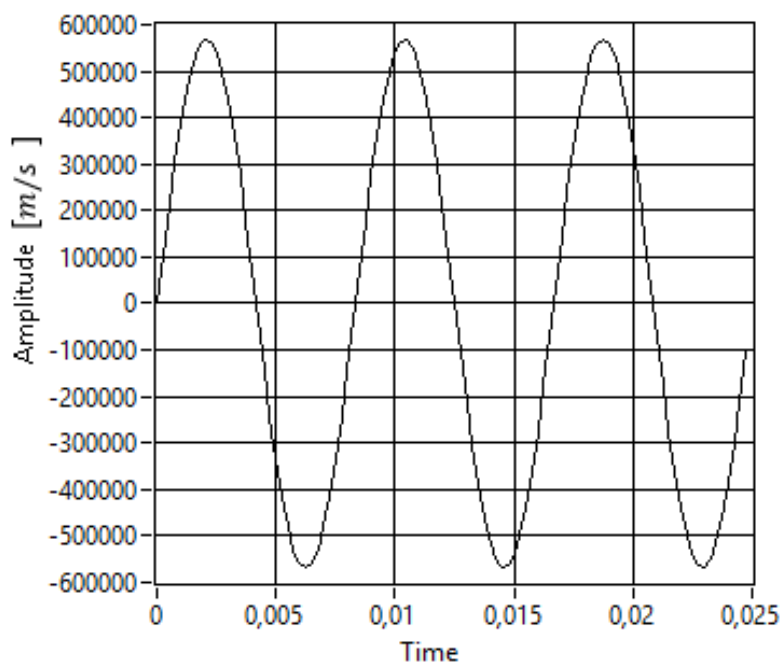
Figura 16 – Exemplo de um movimento periódico (função harmónica).

É de se notar que o tempo da amostragem é dado por  $\frac{N}{f_a} = \frac{100}{4000} = 0.025\text{ s}$  tal como se verifica na Figura 16.

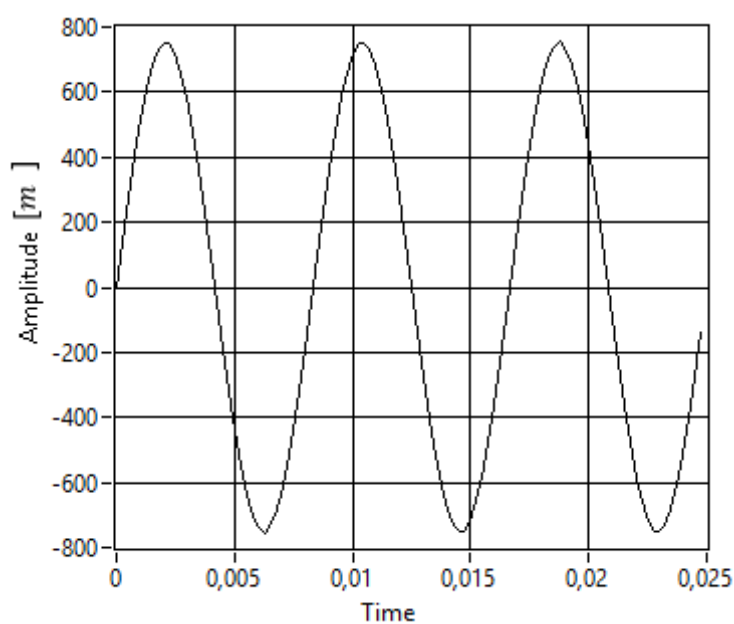
Para o mesmo exemplo, foi criada na aplicação uma opção que permite ao utilizador de seleccionar o tipo de dados (em termos de dados recolhidos em unidades de aceleração, velocidade ou deslocamento). Esta opção está disponível no *painel frontal* e facilita ao utilizador (que apenas tem de escolher em que unidades pretende recolher os dados, e assim, a aplicação converte qualquer uma das outras unidades em unidades de aceleração), uma vez que quer se fazer a análise no domínio da frequência, é mais viável que a amplitude seja apresentada em unidades de aceleração para uma melhor interpretação dos gráficos representados.

Se a equação do deslocamento é dada pela equação (3), a equação da velocidade é a derivada do deslocamento (o que equivale a multiplicar o sinal por  $\omega$ ) e a equação da aceleração é a segunda derivada do deslocamento (o equivalente a multiplicar o sinal por  $\omega^2$ ). O contrário também é válido para converter velocidade em aceleração ou deslocamento em aceleração.

A Figura 17 ilustra um exemplo, em que os dados são adquiridos em unidades de velocidade e de deslocamento para os gráficos de cima e de baixo respectivamente.



a)



b)

Figura 17 -Gráficos convertidos de unidades de aceleração para unidades de velocidade (a) e para unidades de deslocamento (b) de um sinal sinusoidal simulado

O processo de análise de vibrações é aplicável a todo o equipamento mecânico (tendo em conta que monitorar um equipamento complexo a baixas frequências (frequências críticas) é um processo crítico), e requer uma recolha de dados de uma máquina complexa que devem ser decifrados, pois o gráfico de um elemento mecânico é muito complexo. Isto acontece porque existem geralmente várias fontes de vibração, e cada fonte gera a sua própria curva, mas estas são adicionadas e exibidas sob forma de um perfil composto. Perfis estes que podem ser exibidos no domínio do tempo e no domínio da frequência.

Segundo Mobley, 1999, a maioria das primeiras análises de vibração foram realizadas utilizando equipamentos analógicos, exigindo assim o uso de dados no domínio do tempo, até que os microprocessadores incorporaram um método direto (FFT) para transformar o domínio do tempo em domínio de frequência.

A grande vantagem de apresentar os dados no domínio da frequência é a habilidade para normalizar a componente de vibração de uma máquina complexa ao dividi-la em componentes discretos que apresentam uma fonte de vibração específica.

Todos os problemas e modos de falha comuns em máquinas apresentam diferentes frequências de vibração em componentes que podem ser isolados e identificados

Todas as máquinas com elementos em rotação geram forças mecânicas durante uma operação normal, e à medida que a condição mecânica muda devido ao desgaste (mudanças no ambiente de operação, variações de carga, ...) essas forças também mudam.

Um perfil de vibração que resulte de um movimento é causado por uma força de desequilíbrio.

## **2.2 Análise espectral usando a Transformada Rápida de Fourier (FFT)**

O processo de análise espectral é um conjunto de técnicas matemáticas que permitem obter o conteúdo em frequências de qualquer sinal, a que se dá o nome de espectro, controlando as combinações de sinais de frequências distintas que o constituem. Aplicando esta técnica, assume-se que determinadas operações se realizam mais facilmente no domínio da frequência, enquanto outras têm mais facilidade no domínio do tempo.

A FFT é uma versão mais rápida da DFT (razão pela qual é a mais utilizada para o processamento de sinais) e tem como uma das principais aplicações a análise espectral (análise do conteúdo de frequência de sinais).

Para o uso de uma FFT na análise de sinais de tempo contínuo, deve-se considerar a frequência de amostragem a registrar (que no caso desta simulação é de 4000 amostras por segundo e um tempo de amostragem de 0.025 segundos), o número de pontos a usar (que no caso da simulação é de 100 pontos).

As operações são realizadas sobre o sinal de tempo contínuo e os dados resultantes do cálculo da FFT podem não representar exatamente o espectro original. Para evitar esses efeitos indesejados como *Aliasing*, *Leakage* e problemas na amostragem, deve-se controlar alguns parâmetros na reconstrução do espectro como a frequência de amostragem, aplicação de janelas (formato e comprimento da janela) e o número de pontos.

Esta metodologia funciona decompondo um sinal real com variação no tempo, em várias componentes, cada uma contendo uma amplitude, fase e frequência. Relacionando as frequências com as características do equipamento e por observação das amplitudes, pode-se identificar problemas com relativa precisão. A transformada permite passar de uma descrição temporal de uns dados valores do sinal para uma descrição em frequência constituída pelos mesmos valores das amplitudes complexas das harmônicas constituintes do sinal. A FFT é um algoritmo de cálculo que funciona sobre uma amostra de um sinal, sendo necessário definir um período de amostragem e o número de amostras.

Na Tabela 1 apresenta-se os dados utilizados na construção do sinal representado na Figura 18.

Tabela 1 - Dados de amplitude e frequência da simulação em LabView

	Sinal 1	Sinal 2	Sinal 3
$A_{pico}$ [ $m/s^2$ ]	1	3	5
$f$ [Hz]	120	160	240

A Figura 18 ilustra a simulação de três sinais sinusoidais somados no domínio temporal com valores de amplitude e frequência tal como se ilustrou na Tabela 1 com uma frequência de amostragem de 4000Hz e 100 pontos.

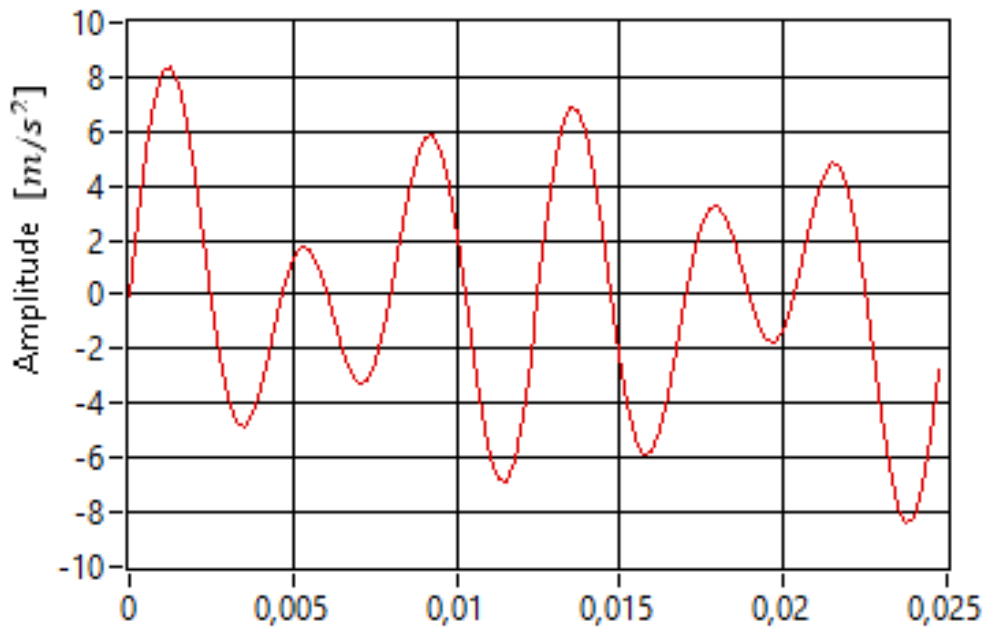


Figura 18 - Sinal em domínio temporal de uma função sinusoidal sem ruído (desativado)

A Figura 19 ilustra o espectro de frequência da simulação referida no gráfico anterior, representado em valores de amplitude de pico.

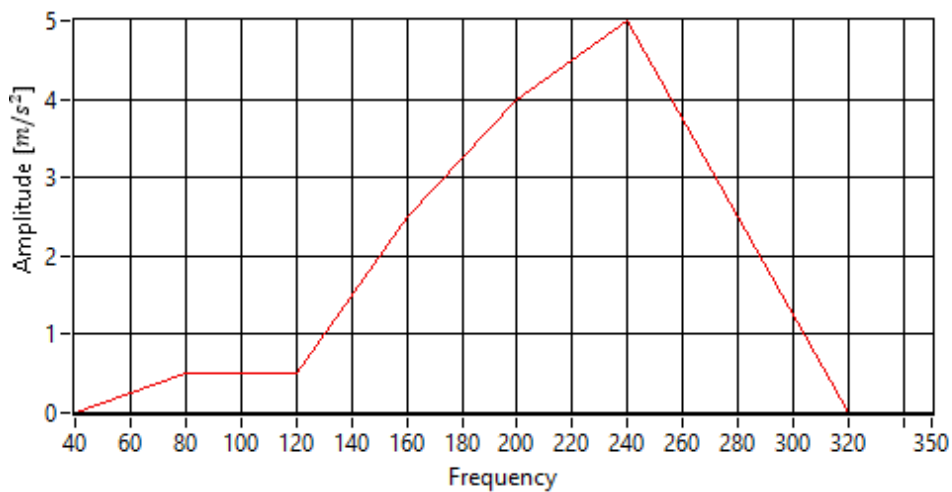


Figura 19 - Espectro de frequência (janela hanning - Peak)

O objetivo neste capítulo é mostrar a consistência dos resultados de uma simulação referente a três sinais sinusoidais combinados no domínio temporal e o seu respectivo espectro de frequência com os conceitos teóricos e assim prevenir potenciais problemas que podem ocorrer na parte da aquisição e processamento de sinal.

Por isso, tomemos em consideração a Figura 16, que é um exemplo muito simples e que se conhecem os valores esperados. Esta fase do trabalho é importante na medida em que constitui a fase verificação da implementação computacional.

Neste caso, quis-se reproduzir a amplitude do espectro em valores de *Root Mean Square*, e para o sinal em causa deve-se esperar um  $RMS = \frac{1}{\sqrt{2}} \times 1 \frac{m}{s^2} = 0.7071 m/s^2$  para uma frequência de 120Hz. Estes são os valores a esperar no espectro de frequência deste sinal, tal como se ilustra na Figura 20.

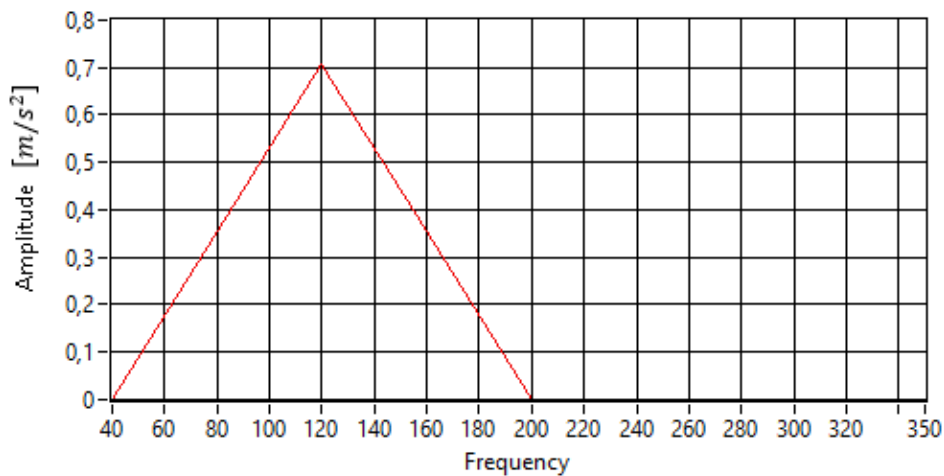


Figura 20 - Espectro de frequência do sinal sinusoidal

## 2.3 Aplicação de janelas

Existem diversos tipos de janelas, com diferentes características de formato, que influenciam o seu espectro, e é importante a utilização de janelas para:

- reduzir o efeito de *leakage* ou vazamento espectral e, portanto, atenuar as raias laterais do espectro calculado e melhorar a identificação de frequências;
- alargar a banda em torno das raias principais, afetando a identificação da amplitude.

*Spectral leakage* é um fenómeno que se apresenta no espectro calculado quando a amostragem do sinal não cobre ciclos inteiros. Se o sinal tiver frequências muito próximas entre si, este fenómeno dificulta a identificação das mesmas.

Um sinal analógico obtido é submetido a amostragens com intervalos de tempo fixos com descontinuidades no início e no fim das amostragens. Desta forma é necessário atenuar esses extremos através da aplicação de janelas (mas sem adicionar o erro de aplicação de janelas). Considerando que as amplitudes no início e no fim da amostragem sejam nulas para possivelmente aumentar as características espectrais do sinal amostrado, ou seja, reduzir a perda espectral.

Aplicar uma janela a um sinal no domínio do tempo é equivalente a multiplicar o sinal pela função que representa a janela. Pois, como a multiplicação no domínio do tempo é equivalente a convolução no domínio da frequência, o espectro de um sinal com janela (windowed) é a convolução do espectro do sinal original com o espectro da janela. Dessa maneira, a aplicação de janelas modifica a forma do sinal tanto no domínio do tempo quanto no da frequência.

Existem vários tipos de janelas disponíveis para essa análise, e várias delas já estão implementadas no software LabView, nomeadamente, retangular(nenhuma), hanning, hamming, kaiser-bessel, triangular e flat-top. Dependendo da aplicação, algumas podem ser mais úteis que as outras, sendo que as mais comuns são: retangular, hanning e flat-top.

Segundo Lyons, 2004 e Kalkman, 1995, pode-se reter algumas conclusões relativamente a aplicação de janelas:

- A duração da janela é muito menor que a duração total do sinal.
- A janela toma trechos do sinal ao longo do tempo.
- Quanto mais estreita a janela, maior a resolução no tempo e menor em frequência.
- Para cada deslocamento da janela em relação ao sinal tem-se uma *DFT*.
- Não se pode ter uma boa resolução no tempo e em frequência ao mesmo tempo usando a *DFT*.

### 2.3.1 Retangular

Esta janela possui o valor igual a 1 sobre todo o seu intervalo de tempo. Matematicamente, uma janela de tamanho N pode ser definida por

$$w(n) = \begin{cases} 1 & \text{se } |n| \leq \frac{N-1}{2} \\ 0 & \text{de outra forma} \end{cases} \quad (5)$$

Aplicar uma janela retangular é equivalente a não utilizar qualquer janela, pois possui o maior volume de perda espectral. Apresenta-se um exemplo na Figura 21.

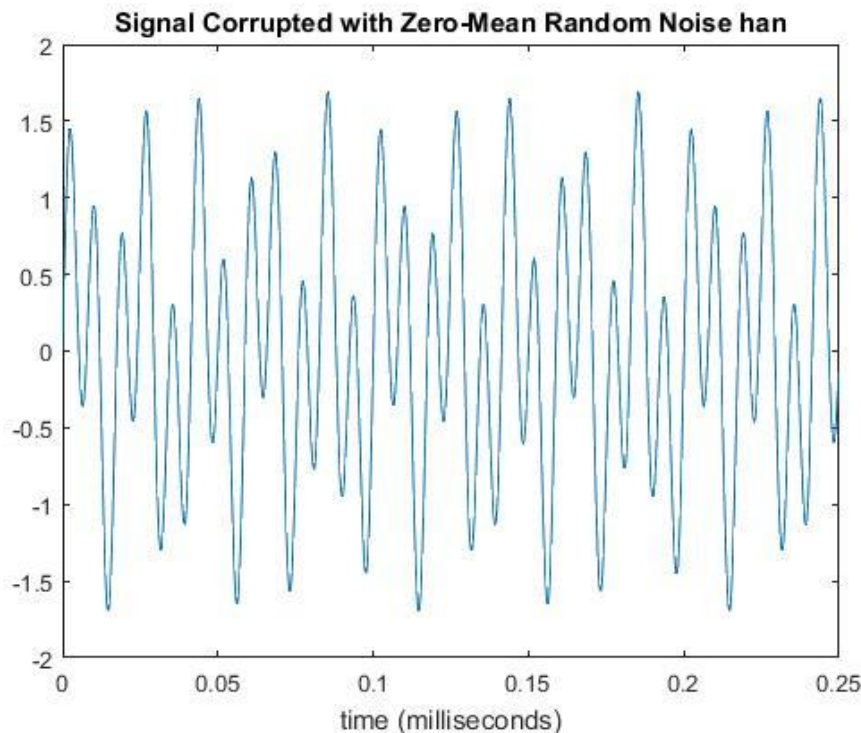


Figura 21-Janela retangular

Esta é útil para a análise de transientes que possuem uma duração menor do que a da janela em análise. Esta é utilizada em situações em que não se pretenda alterar muito o sinal com a aplicação do efeito de janela. Boa precisão em termos de frequências, mas fraco em amplitudes de vibração.

### 2.3.2 Hanning

Esta janela possui uma forma de meio ciclo de uma forma de onda co senoidal. Matematicamente, uma janela hanning pode ser definida por

$$w(n) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos \frac{2\pi n}{N-1} \quad \text{se } |n| \leq \frac{N-1}{2} \quad (6)$$

A Figura 22 apresenta um exemplo de aplicação da janela hanning.

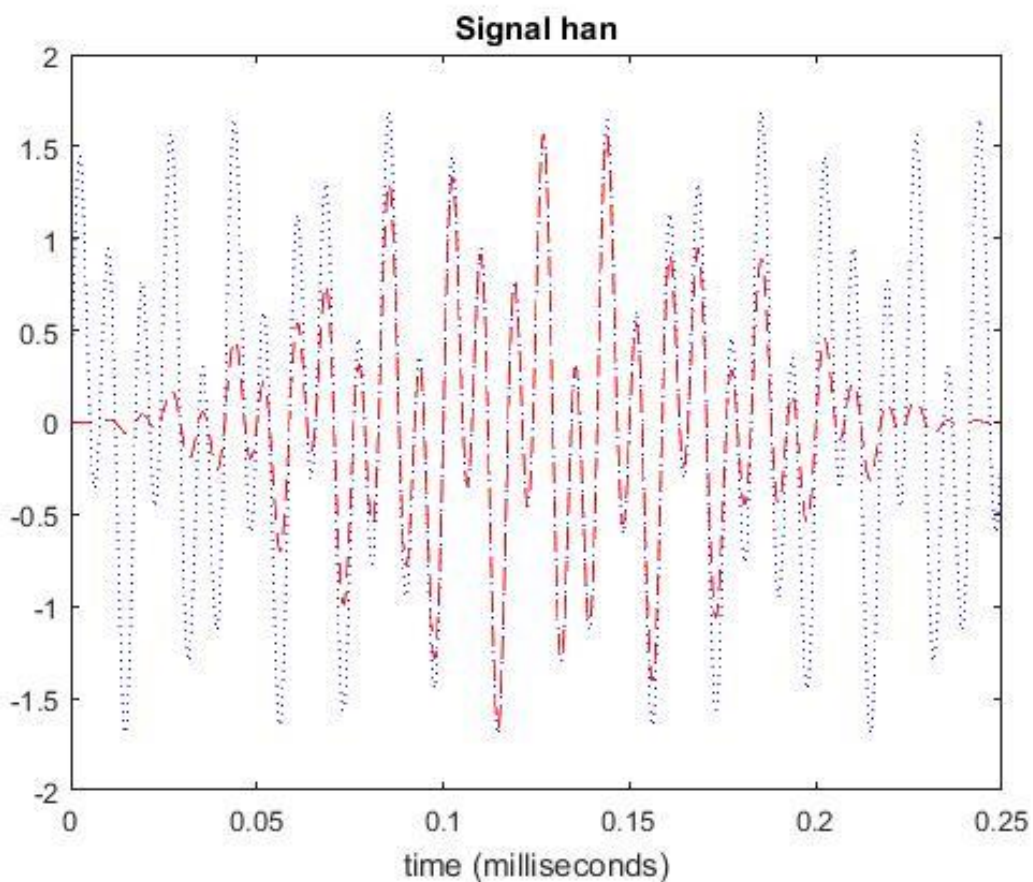


Figura 22-Janela Hanning

Esta janela é útil para a análise de transientes maiores que o tempo de duração da janela e também para aplicações de objetivos gerais.

É o tipo de janela mais aplicado por ser viável em praticamente todo o tipo de situações. Estabelece resultados satisfatórios entre a precisão em termos de amplitude e a frequência, com o objetivo de as amplitudes do espectro estarem muito próximas dos valores reais e reduzir assim o número de frequências características de componentes que não existam na realidade

### 2.3.3 Hamming

É uma versão modificada da janela de hanning e tem a mesma forma de onda co senoidal. Matematicamente, uma janela hamming pode ser definida por

$$w(n) = 0.54 - 0.46 \cos \frac{2\pi n}{N-1} \quad \text{se } |n| \leq \frac{N-1}{2} \quad (7)$$

A Figura 23 apresenta um exemplo de aplicação da janela hamming.

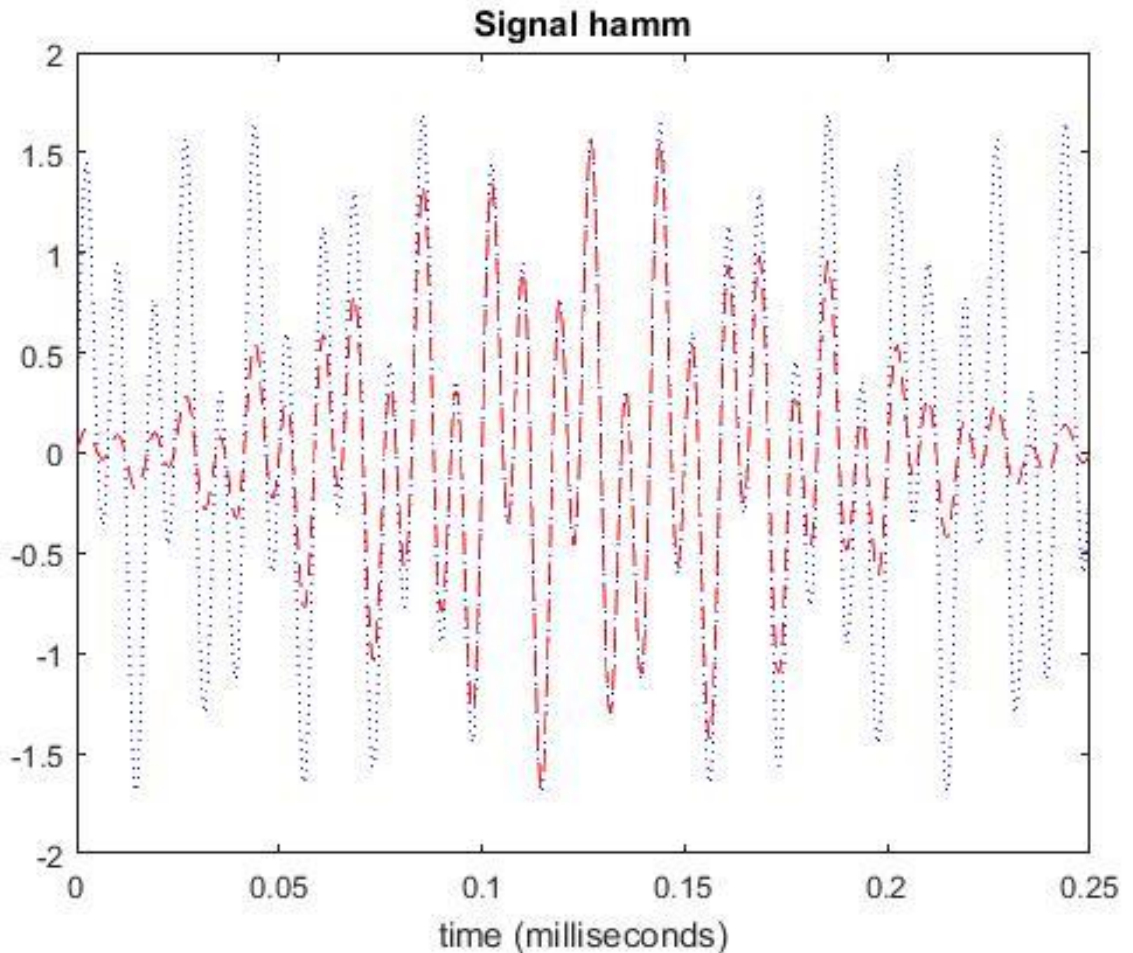


Figura 23-Janela Hamming

As janelas de hanning e hamming são bastante parecidas, a ligeira diferença é que no domínio do tempo a janela de hamming não se aproxima do zero como a janela de hanning.

### 2.3.4 Triangular

Matematicamente, a forma desta janela é a de uma onda triangular do tipo

$$w(n) = 1 - \frac{2|n|}{N-1} \quad \text{se } |n| \leq \frac{N-1}{2} \quad (8)$$

A Figura 24 apresenta um exemplo de aplicação da janela triangular.

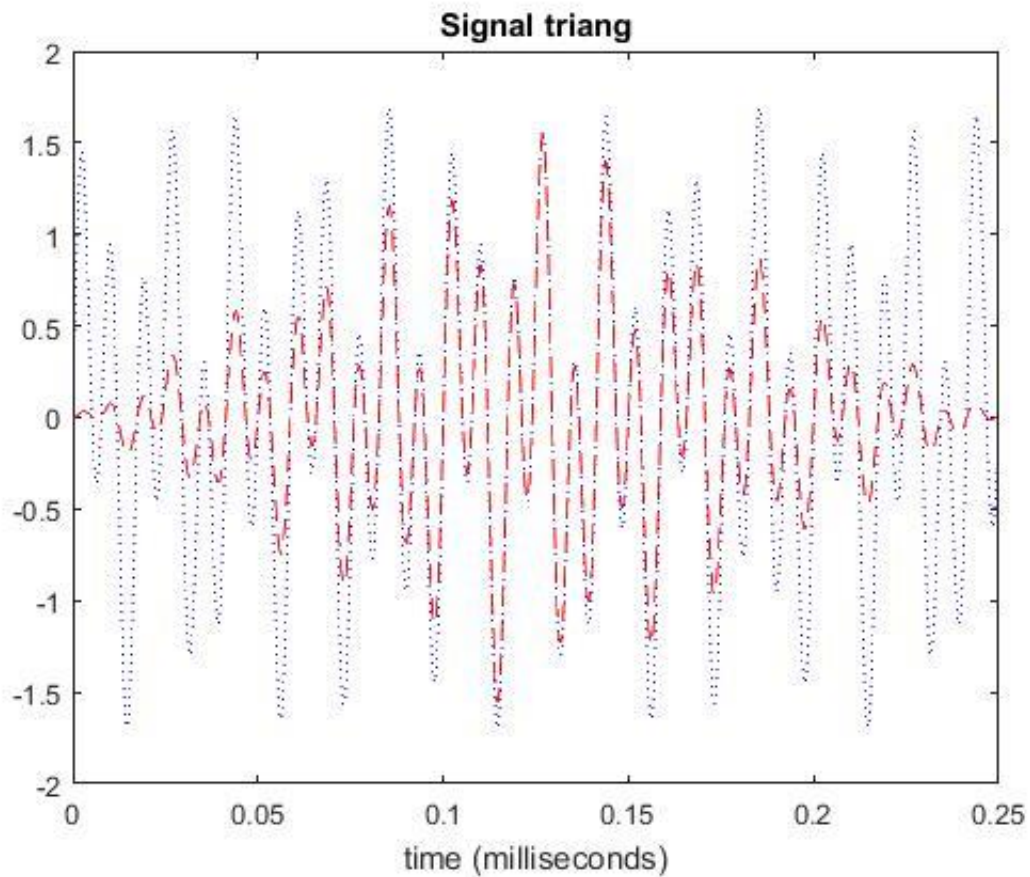


Figura 24-Janela Triangular

### 2.3.5 Kaiser-Bessel

Kaiser, 1974, usou uma janela Bessel para mudar a fatia do sinal. Dependendo da aplicação, pode-se modificar a forma da janela para controlar a perda espectral. Matematicamente, uma janela Kaiser-Bessel pode ser definida por

$$w(n) = \frac{I_0 \left( \alpha \sqrt{1 - \left( \frac{2n}{N-1} \right)^2} \right)}{I_0(\alpha)} \quad \text{se } |n| \leq \frac{N-1}{2} \quad (9)$$

Em que segundo Allen e Mills, 2003,

$$I_0(t) = 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \frac{1}{n!} \left( \frac{t}{2} \right)^n \right]^2 \quad (10)$$

define a função de Bessel, e para garantir uma janela Kaiser cuja transformada de Fourier suprime os componentes de alta frequência em mais de  $-\Delta \text{ dB}$ , configura-se

$$\alpha = \begin{cases} 0.1102(\Delta - 8.7) & \text{se } \Delta > 50 \\ 0.5842(\Delta - 21)^{0.4} + 0.07886(\Delta - 21) & \text{se } 50 \geq \Delta \geq 21 \\ 0 & \text{se } 21 > \Delta \end{cases} \quad (11)$$

A Figura 25 apresenta um exemplo de aplicação da janela Kaiser-Bessel.

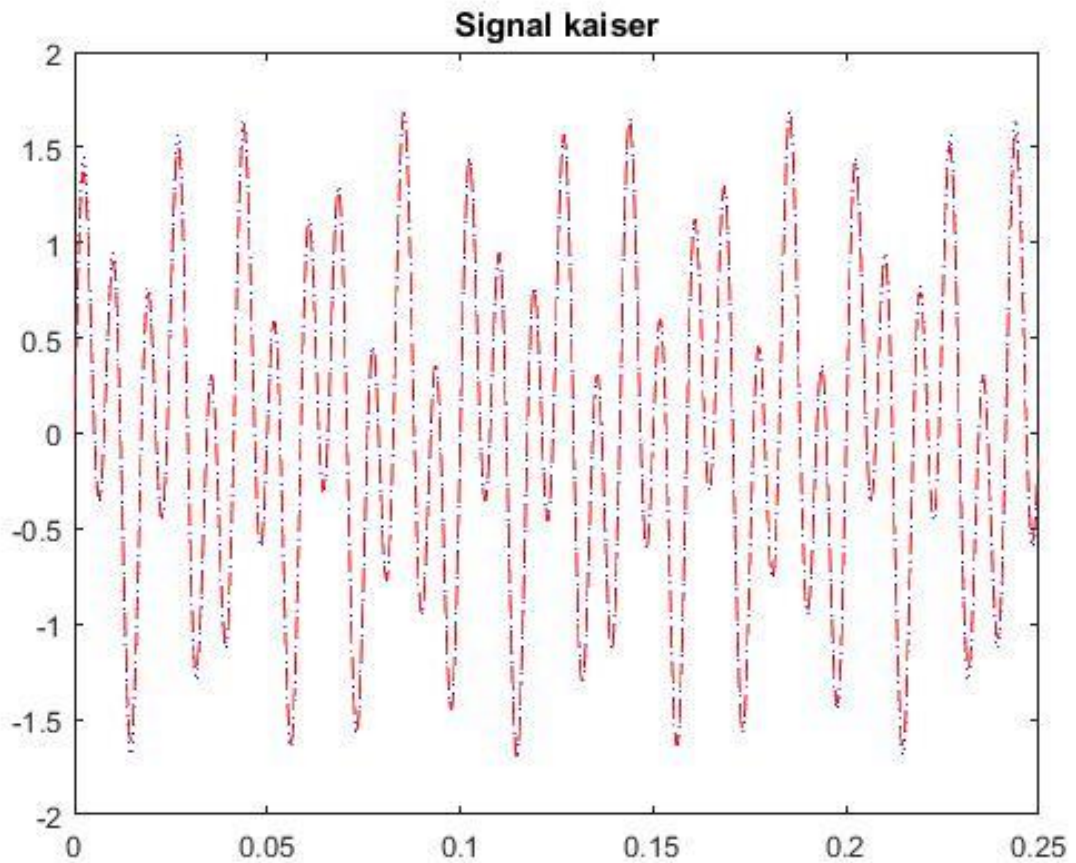


Figura 25- Janela Kaiser-Bessel

Esta janela é boa para detecção de dois sinais com a mesma frequência com amplitudes significativamente diferentes.

Existe um o parâmetro  $\beta$  que pode variar entre 0.1 e 5 e a medida que cresce, a sua forma distancia-se da forma da janela retangular e aproxima cada vez mais as extremidades do centro.

### 2.3.6 Flat top

Esta janela possui a melhor precisão em amplitude entre todas as janelas. O aumento da precisão em amplitude (0,02 dB para sinais entre ciclos integrais) está no custo da seletividade de frequência, e é a mais útil em medições precisas de amplitudes de componentes simples de frequências.

$$w(n) = a_0 - a_1 \frac{2\pi n}{N} + a_2 \frac{4\pi n}{N} \quad (12)$$

com  $n=0, 1, 2, \dots, N-1$  e  $a_0 = 0,2810638602$  e  $a_1 = 0,1980389663$ .

A Figura 26 apresenta um exemplo de aplicação da janela flat top.

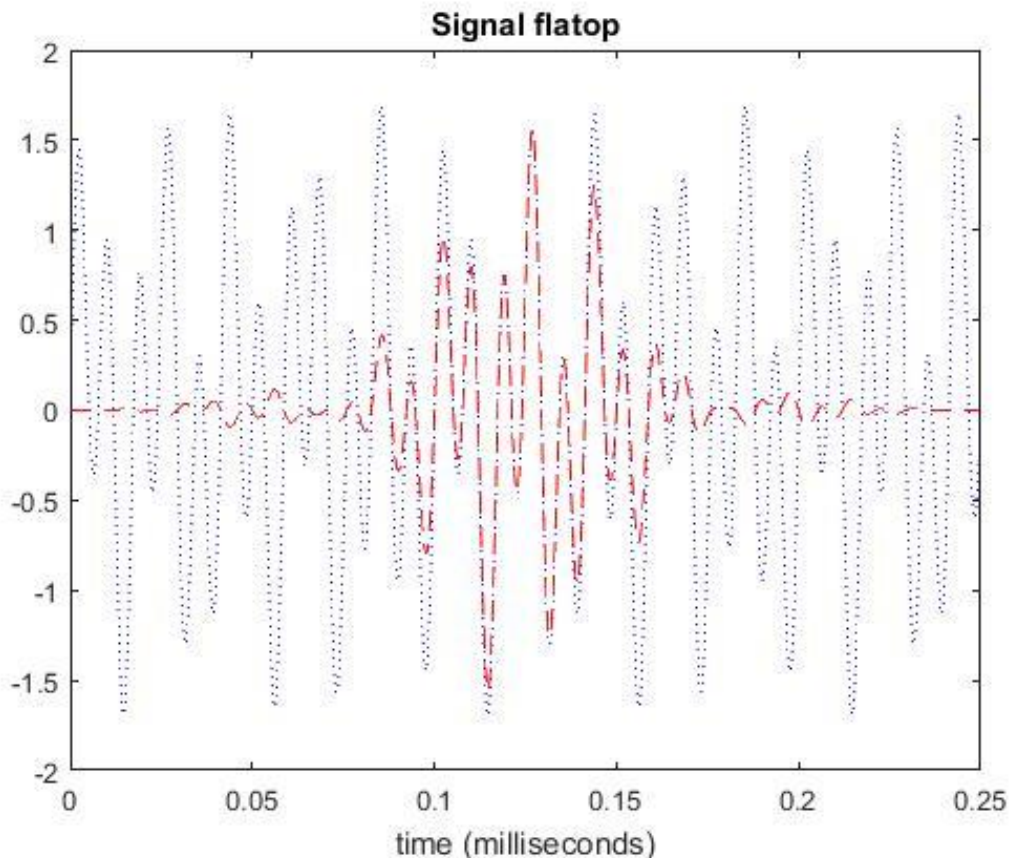


Figura 26-Janela flat top

Esta é a segunda opção mais viável, pois apresenta boa precisão em termos de amplitude, mas peca na precisão das frequências;

## 2.4 Largura de banda (Bandwidth)

A largura de banda engloba duas variáveis, a  $f_{max}$  e as linhas de resolução (LR). O número de LR depende do tipo de aparelho.

Como a *largura de banda* =  $\frac{f_{max}}{LR}$  e *tempo de amostragem* =  $\frac{LR}{f_{max}}$ , é fácil notar que aumentando o valor da  $f_{max}$ , aumenta-se o campo de visão e diminui o tempo de amostragem. Se o valor de LR se mantiver constante, este resultado compromete a resolução do espetro e assim perder informação importante. Por outro lado, diminuindo o valor da  $f_{max}$ , pode-se perder informação em frequências mais altas.

Para se obter dados significativos de frequência na faixa gerada pelos componentes da máquina onde ocorrem as falhas num programa de manutenção preditiva no âmbito das vibrações mecânicas deve-se ter uma especial atenção à configuração da faixa de frequências de banda, pois configurações inadequadas poderão produzir dados em faixas de frequência onde os problemas não existem e sem pistas sobre eventuais problemas sérios que possam vir a existir nos elementos rotativos.

É de notar que os dados de largura de banda podem não ser suficientes para identificar falhas em elementos rotativos específicos da máquina, pois são limitados ao valor da energia total contida

na janela de frequências selecionada pelo utilizador. Na melhor das hipóteses, o nível global de vibração fornece uma aproximação bruta da condição da máquina e a sua taxa relativa de degradação, uma vez que os valores disponíveis são relativos a valores do nível global de vibração. Deste modo, fica aqui claro que apesar da importância da especificação da largura de banda, o diagnóstico não poderá ser feito através dos dados de largura de banda.

## 2.5 Aliasing

O efeito de aliasing (sinónimo de frequências réplicas) é a sobreposição dos espectros, e é originado pela formação de ondas a frequências mais baixas que a realidade. Este sinal indesejado é no fundo uma réplica do sinal original, mas com frequências erradas ocasionando deformação do sinal restituído com relação ao sinal original.

Ao processo de medição instantânea de valores de um sinal analógico em intervalos regulares chamamos amostragem (pontos em forma de onda discreta ou digital). Através desses pontos é gerada uma curva. Por forma a garantir que as formas de onda reconstruídas se aproximem o melhor possível da forma de onda original é necessário passar o sinal por um filtro passa baixo que deve ter uma frequência de corte exatamente igual  $f_{max}$  para não haver interferência simbólica. Este filtro ideal de interpolação é chamado filtro anti-aliasing.

Os filtros anti-aliasing servem para remover sinais indesejados e diferentes do perfil original de vibração, ou seja, remove todas as componentes do sinal acima de  $\frac{f_a}{2}$  antes da amostragem.

Teoricamente este filtro é ideal, mas na realidade este filtro ideal não é fisicamente realizável. Pelo que, a Figura 27 ilustra melhor como funciona um filtro anti-aliasing ( $f_a = 2.56 \times f_{max}$ ).

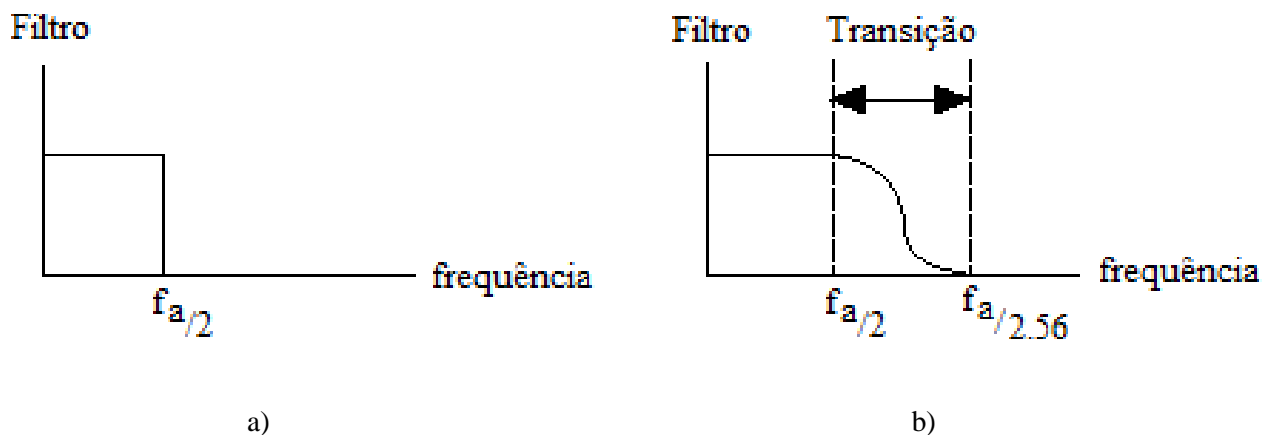


Figura 27 - Filtro anti-aliasing (filtro passa baixo)

A Figura 27.a) ilustra um filtro anti-aliasing ideal, que deixa entrar todas as frequências a baixo de  $\frac{f_a}{2}$  e corta todas as outras indesejadas a cima de  $\frac{f_a}{2}$ .

A Figura 27.b) ilustra um filtro como os realizáveis na prática, este tipo de filtros deixa entrar todas as frequências a baixo de  $\frac{f_a}{2.56}$  e corta todas as frequências a cima de  $\frac{f_a}{2}$ . E a banda de transição ainda deixa passar sinal, mas atenuando a sua amplitude.

Existem alguns tipos de filtros que estão disponíveis em LabView. E a relação entre eles está representado a seguir na Figura 28.

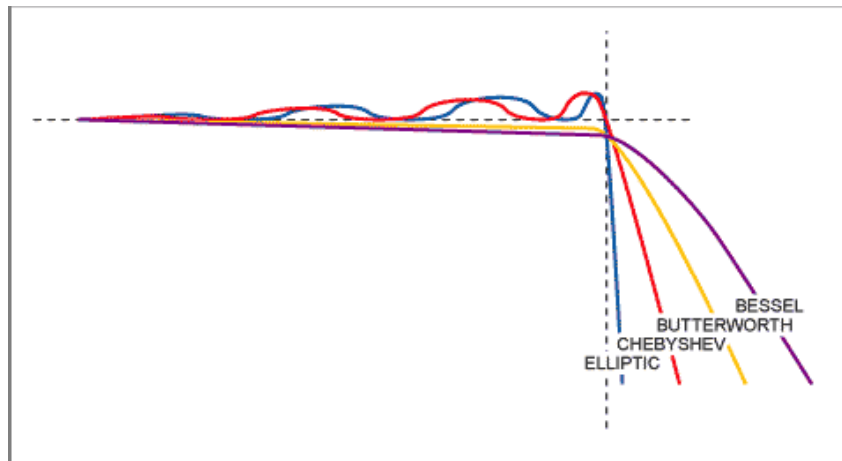


Figura 28 – Tipos básicos de filtros anti-aliasing (National Instruments, 1998)

- O filtro Butterworth possui a região de banda passante mais plana, o que significa que tem a menor atenuação em relação à faixa da frequência desejada, por isso foi o filtro utilizado na aplicação criada em LabView para todos os filtros utilizados.
- O filtro Bessel é mais gradual, mas a vantagem principal é que ele tenha uma resposta de fase linear, o que significa que cada componente de frequência é atrasado por uma quantidade igual de tempo à medida que passa pelo filtro. Uma resposta de fase linear é frequentemente especificada como um atraso de grupo constante, uma vez que o atraso de grupo é definido como a derivada da resposta de fase em relação à frequência.
- O filtro Chebyshev tem uma curva mais acentuada, mas mais ondulação na banda passante.
- O filtro Elíptico possui a curva com um declive mais acentuado.

### 2.5.1 Teorema de amostragem

Na década de 1920, Nyquist (1889 - 1976) descobriu as primeiras ligações teóricas entre sinais analógicos e discretos. No decurso da pesquisa sobre mecanismos de transmissão telegráfica ótimos de Shannon (1916 – 2001), ele deu prosseguimento à descoberta de Nyquist e deu origem ao chamado teorema de Nyquist-Shannon ou teorema de amostragem. Shannon também provou algo que ninguém mais pensou ser possível: comunicação digital sem erros em canais ruidosos. Pouco tempo depois, no final da década de 1940, os computadores digitais começaram a aparecer.

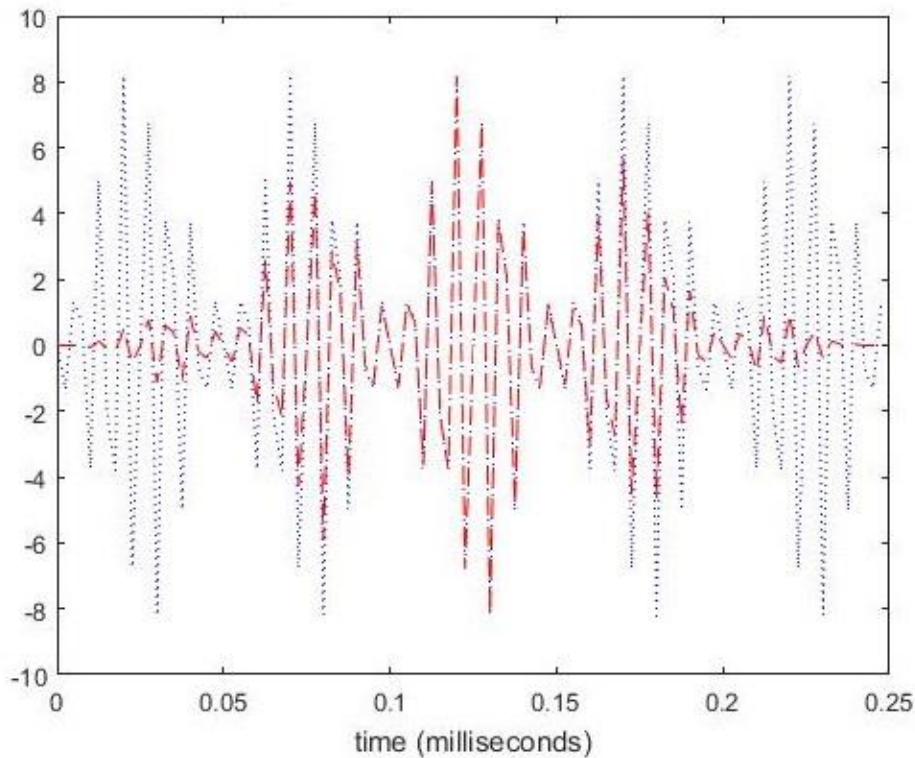
Segundo Niquist, 2002 e Shannon, 1998, o teorema de amostragem diz que um sinal contínuo pode ser amostrado corretamente (preservando toda a informação contida nesse sinal) se, e só se, ele não contiver componentes de frequência acima de metade da frequência de amostragem e se for amostrado em períodos equi-espçados no tempo.

Exemplifica-se a seguir na Figura 29 uma aplicação feita, três sinais contínuos no tempo da função representada na Tabela 2, de banda limitada de  $[0.1Hz - 200Hz]$  cuja frequência máxima é  $f_{max} = 200Hz$ .

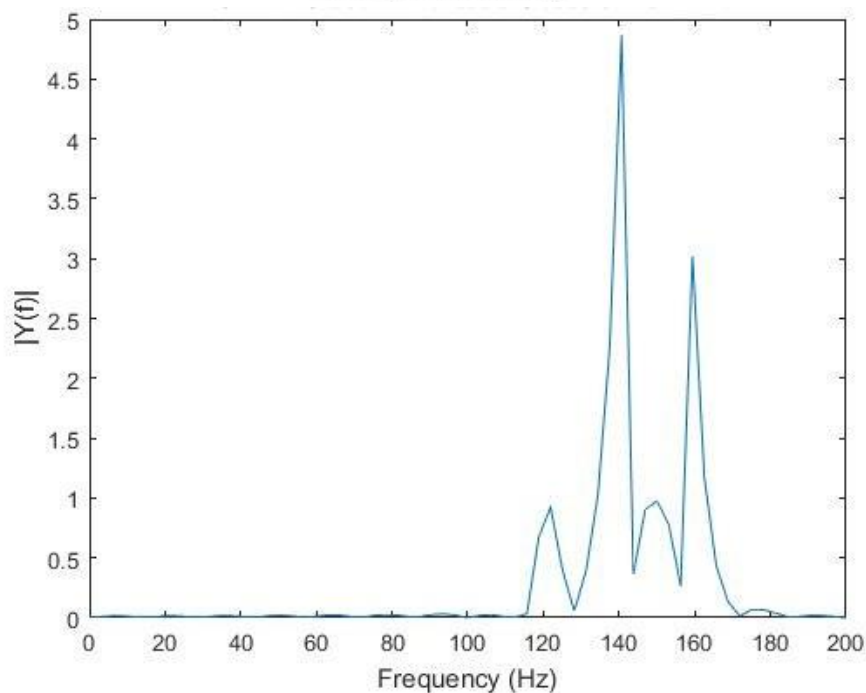
Tabela 2 - Dados de amplitude e frequência para exemplificar o efeito do aliasing

	Sinal 1	Sinal 2	Sinal 3
$A_{pico} [m/s^2]$	1	3	5
$f [Hz]$	120	160	260

- Se os sinais forem amostrados com  $f_a < 2f_{max}$  acontece o fenómeno de aliasing, ou seja, a quantidade de amostras é insuficiente e o sinal reproduzido está errado, tal como se ilustra a seguir na Figura 29.b).



a)



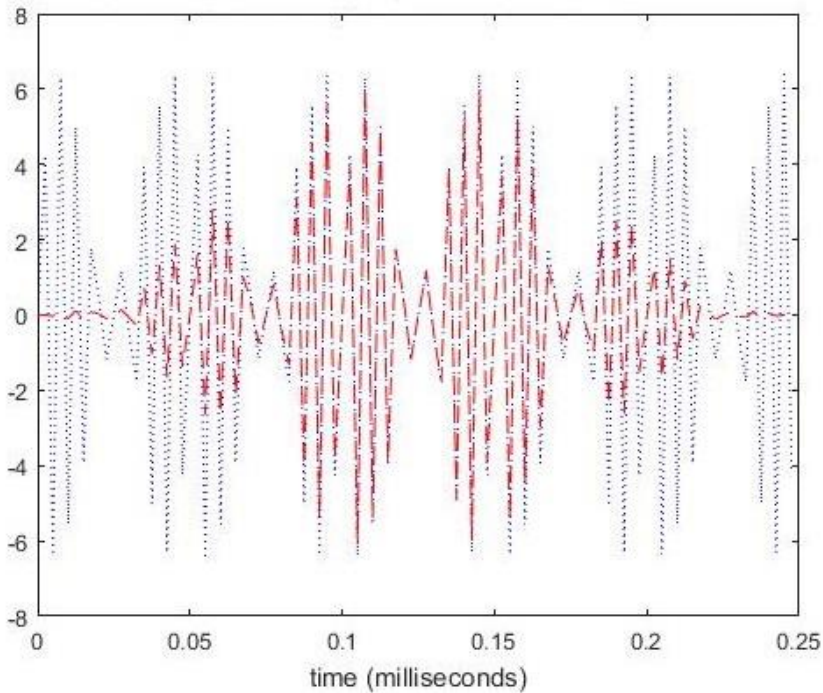
b)

Figura 29 - Representação dos três sinais afetados pelo fenómeno do aliasing em domínio temporal (a), e domínio de frequência (b)

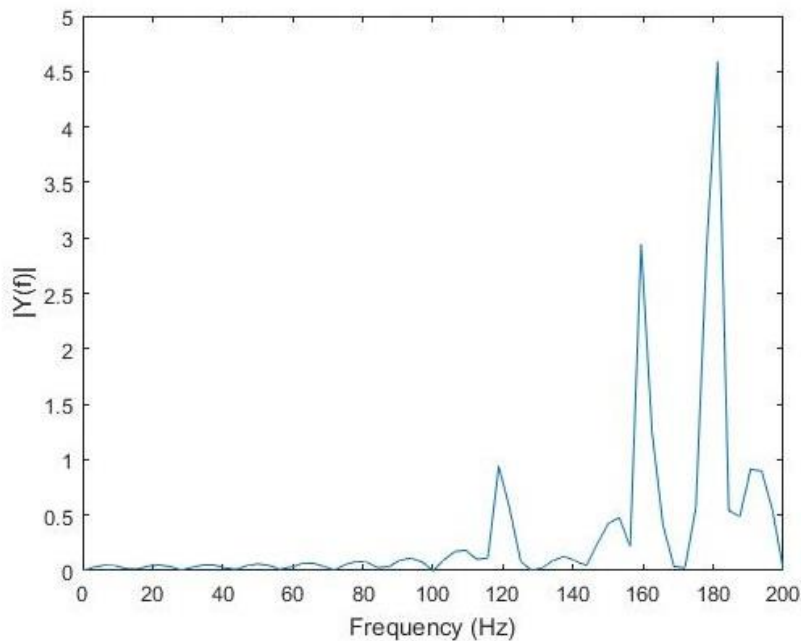
A Figura 29.a) ilustra o sinal no domínio temporal com 100 pontos e uma frequência de amostragem igual a 400Hz ((Figura 29.a) - azul), o que equivale a uma resolução temporal de 0.25 segundos. A este sinal está aplicada a janela hanning ((Figura 29.a) - vermelho) e por isso pode-se notar que existe uma redução de amplitude.

A Figura 29.b) ilustra o espectro de frequência diferente do sinal original. Pode-se observar que a frequência de 260Hz, maior que o valor da metade da frequência de amostragem é refletida no espectro amostrado a 140Hz (é somada a uma das outras frequências do sinal original) fazendo assim com que apareçam no espectro frequências com amplitudes maiores do que são na realidade.

- Se os sinais forem amostrados com  $f_a \geq 2f_{max}$ , segundo o teorema de amostragem, o fenômeno de aliasing é evitado (alterando o valor da  $f_3$  da Tabela 2 para 180Hz), tal como se ilustra a seguir na Figura 30.



a)



b)

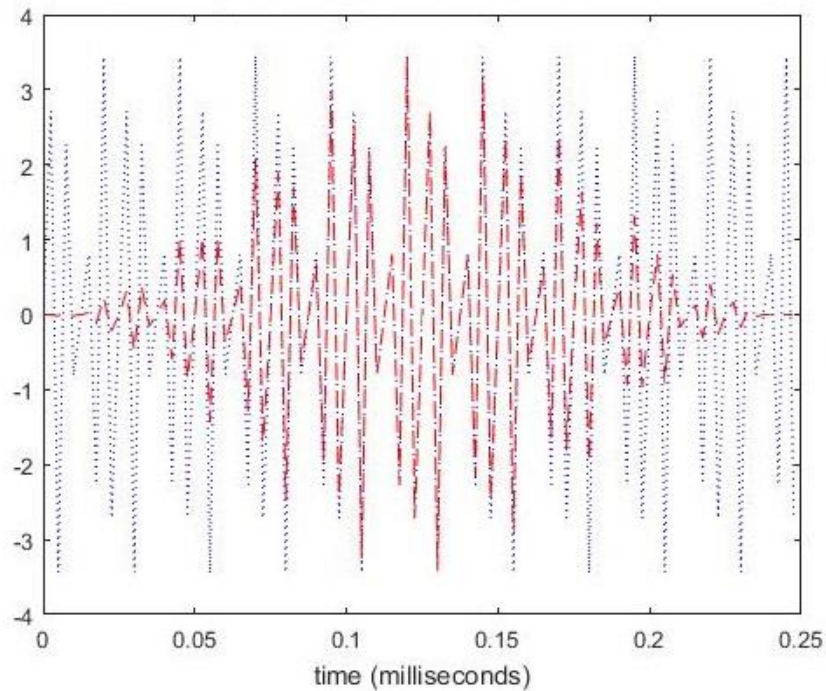
Figura 30 - Representação dos três sinais sem o fenômeno do aliasing em domínio temporal (a), e domínio de frequência (b))

A Figura 30.a) ilustra o sinal no domínio temporal com 100 pontos e uma frequência de amostragem igual a 400Hz (Figura 30.a) - azul), o que equivale a uma resolução temporal de 0.25 segundos. A este sinal está aplicada a janela hanning (Figura 30 - vermelho).

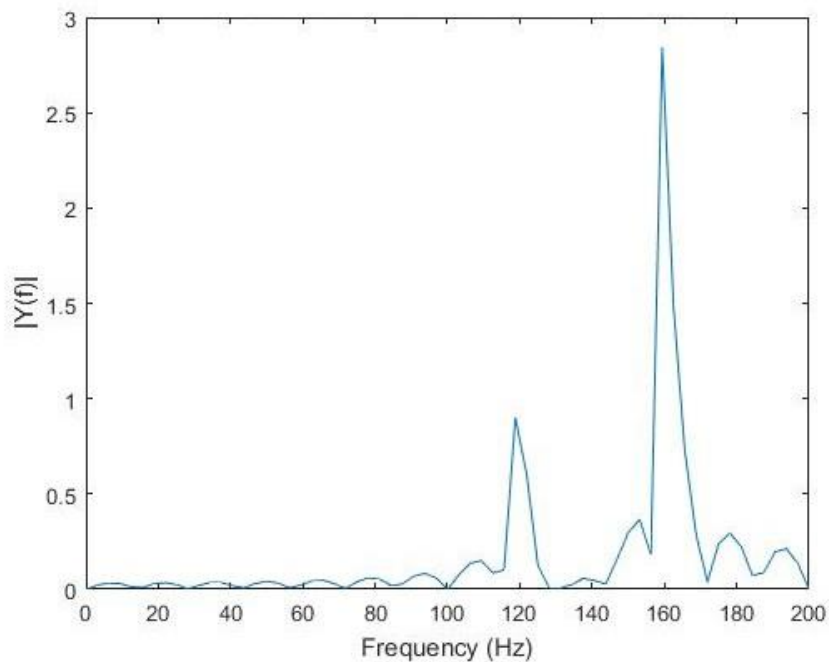
A Figura 30.b) ilustra o espectro de frequência do sinal. Pode-se observar que a metade da frequência de amostragem é maior que a máxima frequência do sinal, o que permite que o sinal seja reconstituído e amostrado com toda a informação do sinal original.

Pode-se notar que mesmo quando se previne o efeito do aliasing e se aplicam janelas ao sinal, ainda assim há uma redução de amplitude no domínio da frequência, isto porque a aplicação de janelas ao sinal (neste caso hanning) tende a aproximar o sinal a zero no início e fim da janela de aquisição para eliminar possíveis descontinuidades que possam dar origem a leakage.

Uma curiosidade leva-me a observar o comportamento do sinal reconstituído quando uma das frequências do sinal é exatamente igual a metade da frequência de amostragem, ou seja,  $f_3 = 200\text{Hz}$ . A representação desta situação é apresentada na Figura 31.



a)



b)

Figura 31 – Comportamento do sinal reconstituído quando uma das frequências do sinal é igual a metade da frequência de amostragem

A Figura 31.a) ilustra o sinal reconstituído no domínio temporal, com uma das frequências iguais a 200Hz. Em comparação com a Figura 30, neste caso a amplitude reduziu mais ainda.

A Figura 31.b) ilustra o espectro de frequência do sinal. Em comparação com a Figura 30, para além da redução de amplitude, não é amostrado o espectro com a frequência igual a metade da frequência de amostragem. Isto também confirma a necessidade e importância do filtro anti-aliasing na amostragem.

Pode-se observar ainda que à medida que se aproxima uma das frequências do sinal à metade da frequência de amostragem ocorre o fenómeno de batimento, tal como se ilustra na Figura 32.

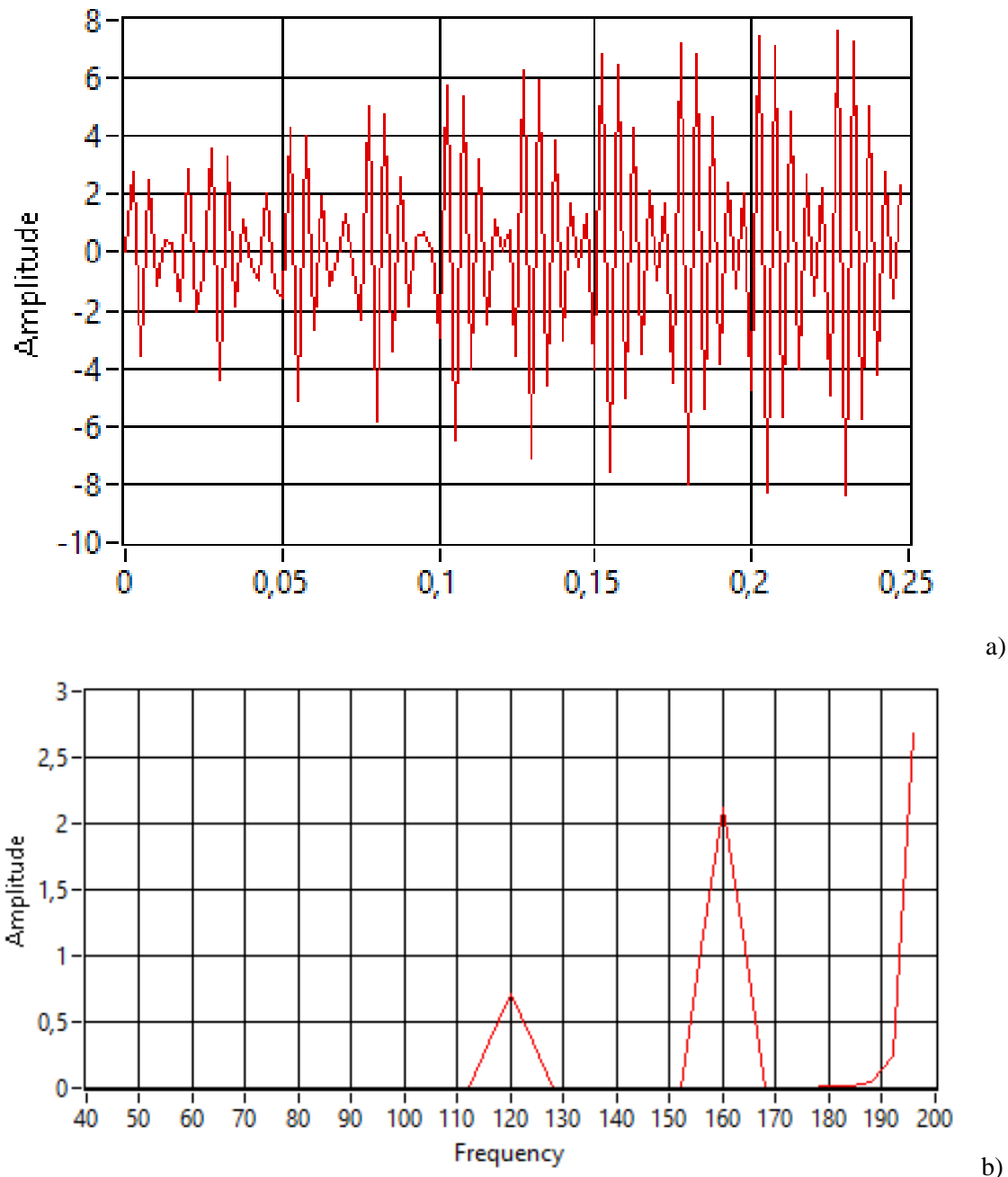


Figura 32 - Comportamento do sinal reconstituído quando uma das frequências é aproximada à metade da frequência de amostragem (LabView)

## 2.6 Média de janela de aquisição

Segundo Mobley, 1999, todas as máquinas estão sujeitas a vibrações aleatórias e vibrações periódicas. E por isso é aconselhável adquirir vários conjuntos de dados e usá-los para eliminar os sinais falsos (efeitos de ruído ou vibrações aleatórias e estranhas ao funcionamento do equipamento).

A média também melhora a repetibilidade dos dados, pois apenas os sinais não aleatórios são mantidos.

Existem no geral quatro tipos de médias, de entre elas,

### No domínio da frequência:

1. Linear - útil na repetição de dados que tende a reduzir ruídos e frequências de vibrações indesejadas, sendo por isso uma das técnicas mais utilizada;
2. Peak hold - registra sempre o maior valor e o espectro final terá o aspeto com esse valor;
3. Exponencial - é dada uma maior importância às medições mais recentes, seguindo uma função exponencial. Metodologia utilizada para observar certas condições que variem lentamente;

### No domínio do tempo:

4. Tempo síncrono - Aplica-se este método em equipamentos que tenham vários elementos rotativos a diferentes velocidades.

## 2.7 Sobreposição de janelas de aquisição

Segundo Mobley, 1999, o parâmetro de sobreposição é usado para determinar a percentagem de sobreposição que será usada para acelerar o tempo de aquisição e processamento de dados. Tal como acontece com o sistema de aquisição de dados convencional, o sistema de aquisição de dados, a média de sobreposição trunca a aquisição de um bloco de dados e inicia a aquisição do próximo. A maioria dos analisadores permite as seguintes seleções de percentagem de sobreposição: 0, 25, 50, 75 e 90.

**25 por cento:** quando 25% de sobreposição é selecionada, o analisador trunca a aquisição de dados quando 75% de cada bloco de novos dados são adquiridos. Os últimos 25% da amostra anterior são adicionados à nova amostra antes do início do processamento. Como resultado, a precisão dos dados pode ser reduzida em até 25% para cada conjunto de dados.

**50 por cento:** quando 50% de sobreposição é selecionada, o analisador adiciona os últimos 50% do bloco anterior a um novo 50%, ou meio bloco, de dados para cada amostra. Quando o número necessário de amostras é adquirido e processado, o analisador calcula a média do conjunto de dados. A precisão pode ser reduzida em 50%.

**75 por cento:** quando 75% de sobreposição são selecionados, cada bloco de dados é limitado a 25% de novos dados e os últimos 75% do bloco anterior. Com sobreposição de 75%, existe um potencial de distorção de dados.

**90 por cento:** quando a sobreposição de 90% é selecionada, cada bloco contém 10% de novos dados e os últimos 90% do bloco anterior. A precisão dos dados médios com sobreposição de 90% é altamente questionável porque cada bloco usado para criar a média contém apenas 10% de

novos dados e 90% de um ou mais blocos que foram extrapolados a partir de uma amostra de 10%.

Quando nenhuma sobreposição é selecionada, o analisador em tempo real adquire sempre blocos completos de novos dados. A taxa de atualização de rastreamento de dados é a mesma que a taxa de processamento de bloco. Esta taxa é regida pelos requisitos físicos que são conduzidos internamente pela faixa de frequência dos dados solicitados.

Muitos dos sistemas de monitorização de vibração baseados em microprocessadores oferecem a capacidade de aumentar sua velocidade de aquisição de dados. Esta opção é referida como média de sobreposição. A média de sobreposição reduz a precisão dos dados adquiridos e deve ser usada com cautela ou evitada. Exceto nos casos em que transientes ou outras características únicas da máquina requerem meios artificiais para reduzir a aquisição de dados e o tempo de processamento. Uma abordagem lógica é reduzir ou eliminar a média total. A aquisição de um único bloco ou amostra de dados reduz o tempo de aquisição de dados ao seu mínimo. Na maioria dos casos, esse intervalo de tempo é inferior ao melhor tempo necessário para adquirir dois ou mais blocos usando técnicas de amostragem de sobreposição máxima. A eliminação da média geralmente fornece dados mais precisos.

## 2.8 Grandezas na medição

De uma maneira geral a técnica de vibrações mecânicas engloba três grandezas de medição: deslocamento ( $mm$ ), velocidade ( $mm/s$ ), e aceleração ( $mm/s^2$ ).

O uso de cada uma delas depende do equipamento, dos resultados esperados e do tipo de instrumentos de medições. No caso do programa elaborado em LabView, os dados são adquiridos dos três sinais em qualquer das unidades a cima citadas e convertidas para a unidade de aceleração para uma correta análise de vibração:

- 1 **Caso A:** dados coletados em unidade de aceleração – neste caso não é necessário fazer qualquer tipo de conversão, e o programa deixa passar continuamente a informação para o espetro.
- 2 **Caso B:** dados coletados em unidade de velocidade – para converter unidade de velocidade para aceleração basta derivar uma vez este sinal, ou seja, multiplicar o sinal uma vez pela sua frequência de rotação.
- 3 **Caso C:** dados coletados em unidade de deslocamento – para converter unidade de deslocamento para aceleração basta derivar duas vezes este sinal, ou seja, multiplicar o sinal uma vez pela sua frequência de rotação ao quadrado.

Em termos de frequências de vibração é habitual haver várias designações. As rotações por minuto (RPM) ou Ciclos por minuto (CPM), ambos com o mesmo significado se nos referirmos à frequências de rotação, ou também se utiliza a unidade Hertz ( $Hz \equiv CPM$ ).

## 2.9 Amplitudes de vibração

**Pico-a-pico:** reflete a amplitude total gerada por uma máquina, um grupo de componentes ou um de seus componentes. Isto depende se os dados coletados são banda larga, banda estreita ou componente. Esta unidade de medida é útil quando o analista precisa conhecer o deslocamento total ou a energia máxima produzida pelo perfil de vibração da máquina.

Tecnicamente, os valores de pico a pico devem ser usados em conjunto com os dados reais do deslocamento do eixo, que são medidos com um transdutor de proximidade ou deslocamento.

Segundo Mobley, 1999, os termos de pico a pico não devem ser usados para dados de vibração adquiridos usando dados de vibração relativos das tampas dos rolamentos ou ao usar um transdutor de velocidade ou aceleração. A única exceção é quando os níveis de vibração devem ser comparados aos gráficos de gravidade de vibração com base nos valores de pico a pico.

**Zero-a-pico ou Pico:** os valores de zero a pico ou simplesmente pico, são iguais a metade do valor de pico a pico. Em geral, os dados de vibração relativa adquiridos usando um transdutor de velocidade são expressos em termos de pico.

**RMS:** é o valor médio estatístico da amplitude gerada por uma máquina, um de seus componentes ou um grupo de componentes. Normalmente, os dados de RMS são usados em conjunto com dados de vibração relativos adquiridos usando um acelerômetro ou expressos em termos de aceleração.

Para um sinal harmónico, a relação entre estes tipos de amplitudes de vibração no espectro de frequência são os seguintes:

$$\text{RMS} = 0.707 \times \text{Pico} \quad (13)$$

$$\text{Pico-a-pico} = 2 \times \text{Pico} \quad (14)$$

A equação (13) apenas é válida para um sinal sinusoidal puro.

## 2.10 Aplicação em LabView

A aplicação elaborada em LabView que foi utilizada para explicar de forma ilustrativa alguns conceitos importantes a ter em conta neste capítulo para que o sinal reconstituído apresente toda a informação verdadeira do sinal original sem ruídos será detalhadamente explicada nesta parte.

É importante explicar que para se confiar nesta aplicação complexa (que foi criada com sub-aplicações simples), foi necessário testar a sua consistência inicialmente para apenas uma função sinusoidal mais simples e fácil de calcular manualmente. E só depois de apresentar os resultados esperados é que se adicionou mais dois sinais para tornar a simulação mais complexa. Esta aplicação foi criada por partes, e estas partes serão explicadas nas ilustrações que se seguem de forma simples para uma melhor compreensão do leitor. Essa explicação será feita apresentando a ilustração do *Diagrama de blocos* (programação) e depois no *Painel frontal* (interface).

A aplicação no seu todo está inserida num ciclo “while”, o que significa que o LabView executa repetidamente a instrução enquanto a expressão booleana for satisfeita.

A Figura 33, ilustra a simulação de três sinais sinusoidais com os respectivos valores de frequência, amplitude e fase. Aos três sinais foi atribuído um comando de controlo do ruído, da frequência de amostragem e do número de pontos de amostragem.

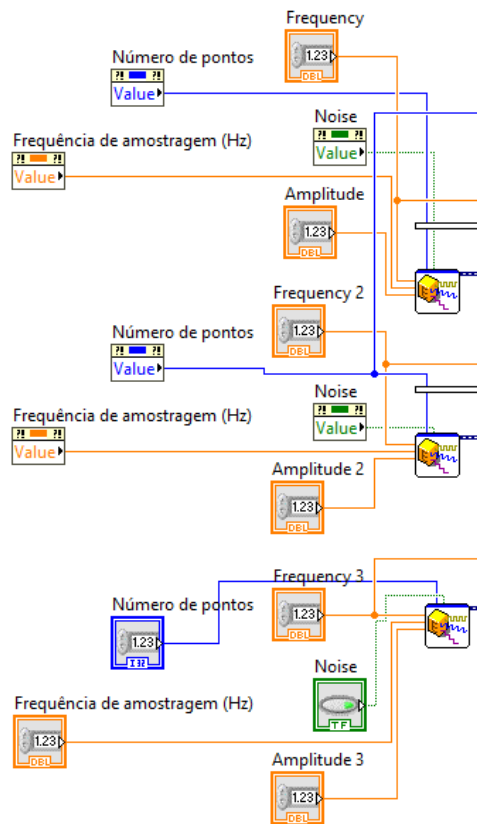


Figura 33 – Aplicação em LabView (parte 1 – Diagrama de blocos)

A Figura 34 ilustra os gráficos das sinusoides criadas pela programação apresentada na figura anterior com os respectivos valores de frequência, amplitude e fase. Os comandos criados são apresentados de forma a que o operador possa manipular esses valores e controlar a existência de ruído ou não na simulação. Para este caso, ao longo da simulação escolheu-se excluir a existência de ruído para facilitar a análise que se pretendia fazer.

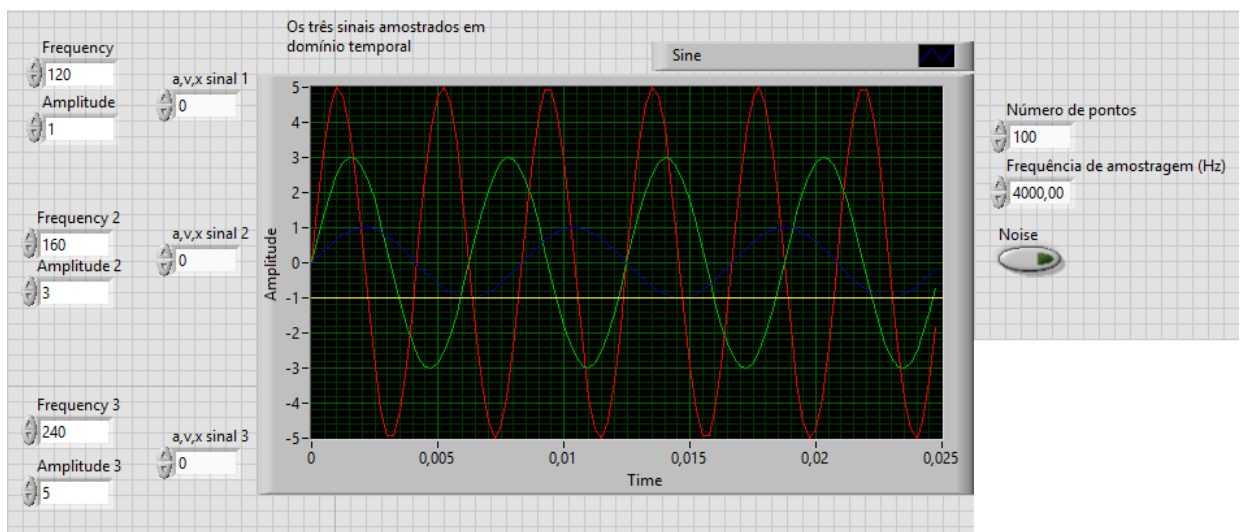


Figura 34 - Aplicação em LabView (parte 1 – Painel frontal)

Como foi visto na secção 2.8, pretende-se tratar os dados em unidades de aceleração para facilitar a análise do espetro no domínio da frequência. Mas estes dados também podem ser recolhidos em unidades de velocidade ou de deslocamento. E se assim acontecer, a aplicação foi feita de modo a que o LabView converta imediatamente esses dados para a unidade pretendida (aceleração) assim que o operador o ordene (Figura 35). Para que isto aconteça foi criado um ciclo “case” logo a saída de cada sinal que se os dados recolhidos forem em unidades de  $a$ ,  $v$  ou  $x$  para o caso 0, 1 ou 2 (Figura 36) respetivamente, a partir de uma ordem dada pelo operador no *Painel frontal* (Figura 34), o LabView converte imediatamente para a unidade de aceleração.

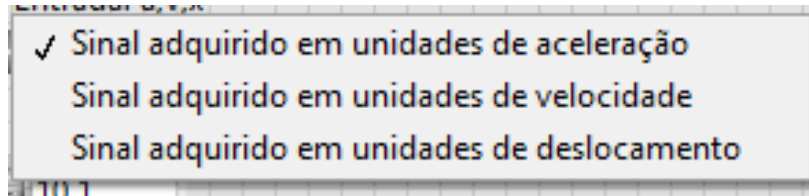


Figura 35 – Bloco para seleccionar a unidade a seleccionar no front painel

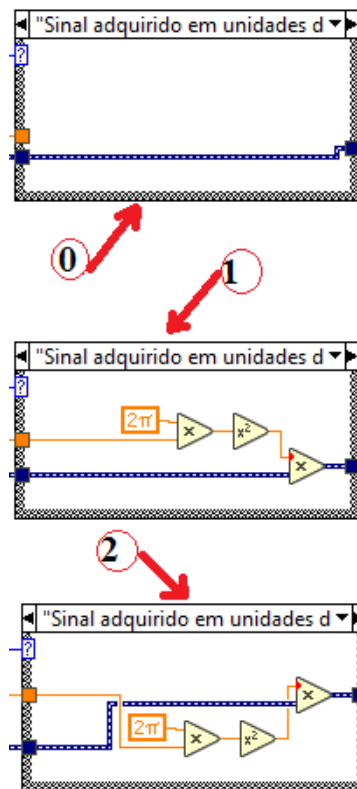


Figura 36 -Case conversor de unidades para aceleração

A Figura 37 ilustra uma parte que foi feita para que o LabView apresente no espetro de frequência (no *Painel frontal*) a amplitude em RMS ou em valores de Pico, dependendo do tipo de análise que o operador deseja fazer ao espetro. A esta parte também foi associado um comando de controlo que permite ao operador fazer essa escolha. Também foi criado um comando de controle que permite ao utilizador escolher, de acordo com os tipos de janelas disponíveis em LabView o mais adequado para o tipo de sistema. No caso desta simulação foi escolhida a janela hanning pois apresenta valores de amplitude e frequência com uma precisão satisfatória, mas, caso seja necessário obter maior precisão em amplitude pode-se utilizar a janela Flat-Top, e se for

necessário obter maior precisão em frequências pode-se utilizar a janela retangular (mas deve ser evitada quando não se trata de transientes).

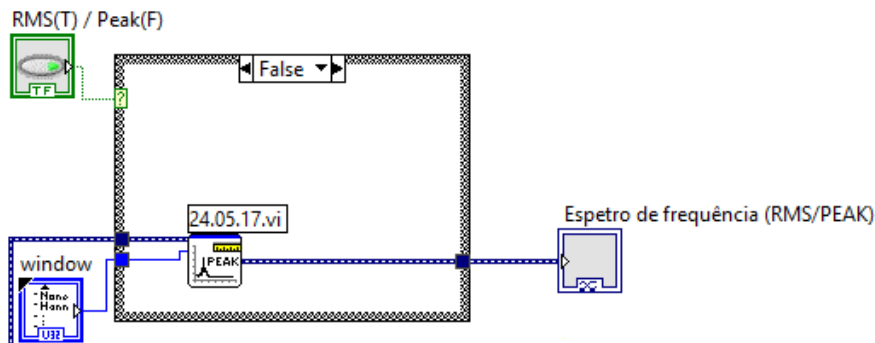


Figura 37 - Aplicação em LabView (parte 2 – Diagrama de blocos)

Os comandos criados e explicados anteriormente são apresentados no *Painel frontal* tal como se ilustra na Figura 38 para uma melhor utilização do operador.

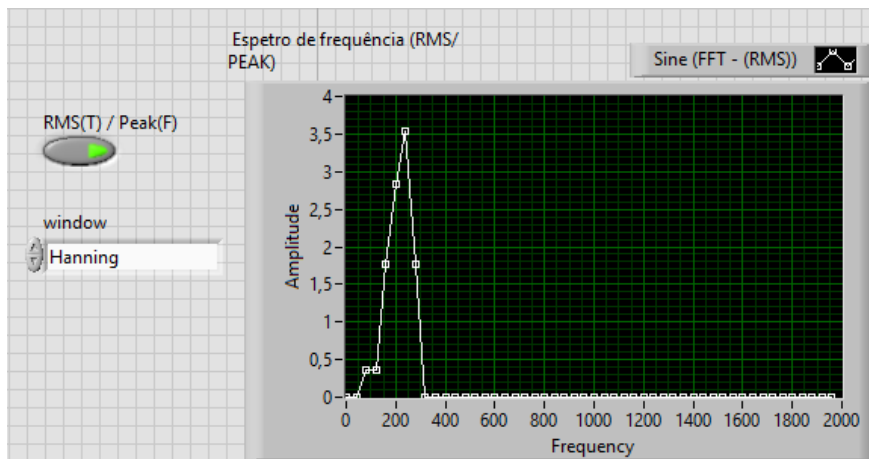


Figura 38 - Aplicação em LabView (parte 2 – Painel frontal)

Nesta parte que se segue criou-se uma conversão dos sinais para uma representação da soma dos sinais nas três unidades acima mencionadas. Para se conseguir este efeito foi necessário recorrer ao uso de integrais, uma vez que a amplitude já estava em unidade de aceleração. Através dos testes realizados com uma simples função sinusoidal foi possível notar a necessidade de utilizar um filtro passa-alto com uma frequência de corte de 0.1 Hz (este valor deve ser superior a zero, e foi escolhido este valor baixo, mas se o utilizador sentir a necessidade de alterar por algum motivo, este pode ser alterado no *Painel frontal* tal como se ilustra na Figura 40) para eliminar a constante de integração de forma a obter o sinal original na sua reconstituição. O filtro escolhido foi o Butterworth.

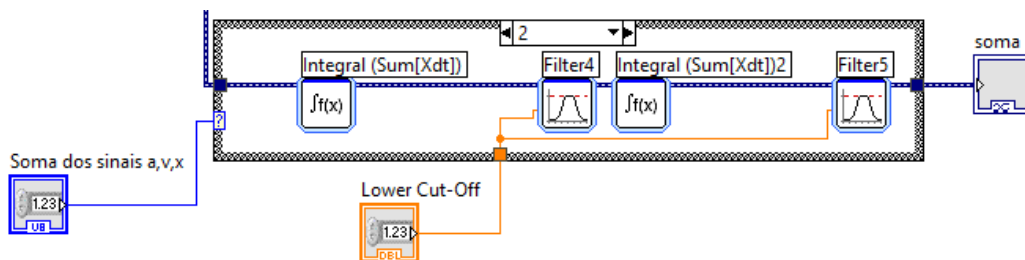


Figura 39 – Aplicação em LabView (parte 3 – Diagrama de blocos)

O operador poderá escolher como pretende visualizar a soma das sinusoides. Se pretende em unidades de  $a$ ,  $v$  ou  $x$ , basta escolher as opções 0, 1 ou 2 respetivamente, tal como se apresenta o painel na Figura 40.

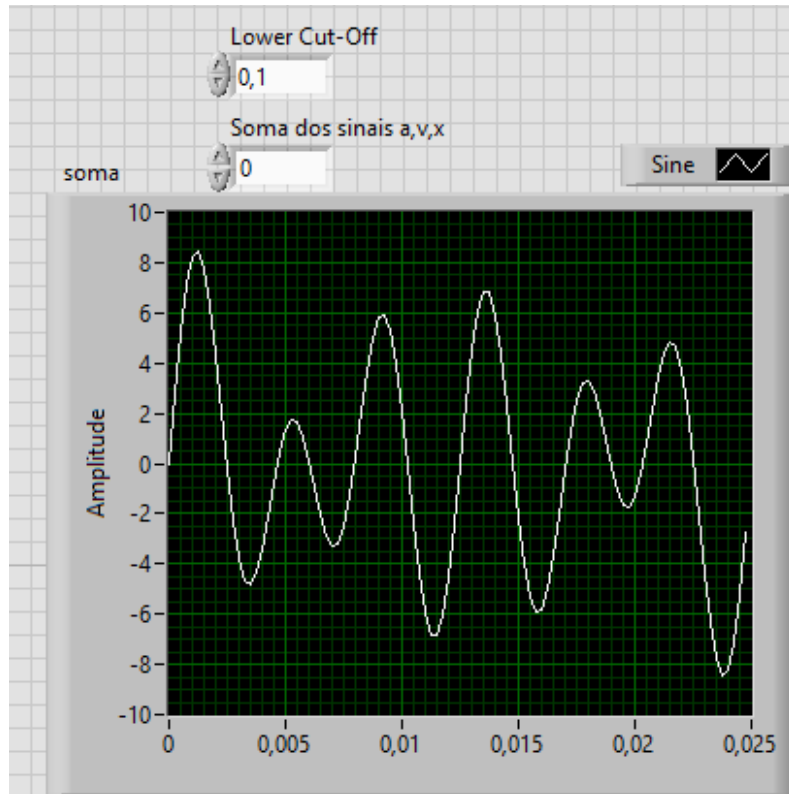


Figura 40 – Aplicação em LabView (parte 3 – Painel frontal)

A seguir se ilustra na Figura 41 a parte que diz respeito ao cálculo da amplitude em valores de RMS para a representação gráfica da evolução desse valor a medida que o tempo passe para que se acompanhe o nível global de vibração do sinal total. Tendo em conta que esse valor estamos no domínio do tempo este valor é calculado utilizando a seguinte expressão:

$$A_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A_i^2} \quad (15)$$

onde A e N dizem respeito a amplitude de vibração e número de pontos respetivamente.

Para calcular a amplitude de vibração no domínio da frequência basta utilizar a Equação 10.

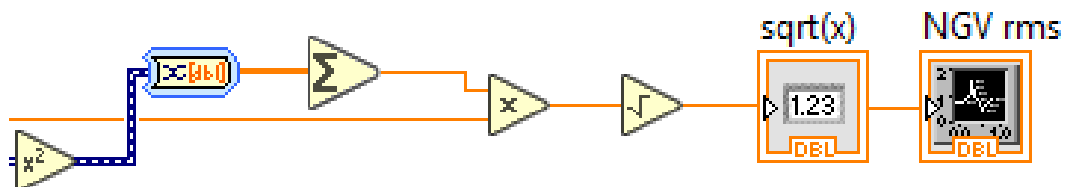


Figura 41 – Aplicação em LabView (parte 4 – Diagrama de blocos)

A Figura 42 ilustra a representação gráfica da evolução da amplitude de vibração e o respetivo valor instantâneo que se encontra visível no painel frontal para que o operador possa acompanhar de forma gradual essa evolução.

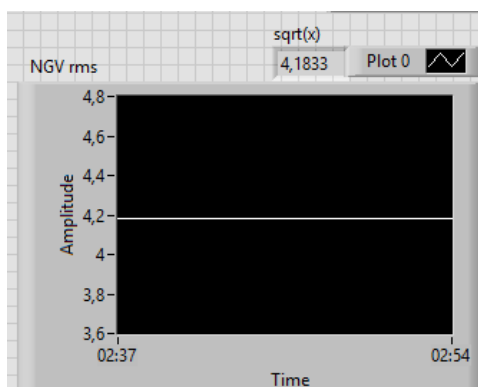


Figura 42 - Aplicação em LabView (parte 4 – Front Painel)

Como já foi dito no capítulo 0, existem diversos tipos de equipamentos. Para uma correta utilização e conservação destes, existem normas legais estabelecidas que delimitam os valores de velocidade de rotação para garantir a fiabilidade da máquina. Tendo em conta o nível global de vibração estabelecido pela norma ISO 10816 – parte 3 (consultar Anexo A) que diz respeito a avaliação da vibração da máquina por medições em peças não rotativas - Máquinas industriais com potência nominal acima de 15 kW e velocidades nominais entre 120 rpm e 15000 rpm. É importante dizer que como a aplicação foi feita com uma frequência de amostragem de 1000Hz, a frequência máxima desta aplicação é de 500Hz.

Baseando-me na Norma ISO 10816 – parte 3, foi criado um bloco com limites de velocidades apenas quando o nível global de vibração é exibido em unidades de velocidade tal como se ilustra na Figura 43.

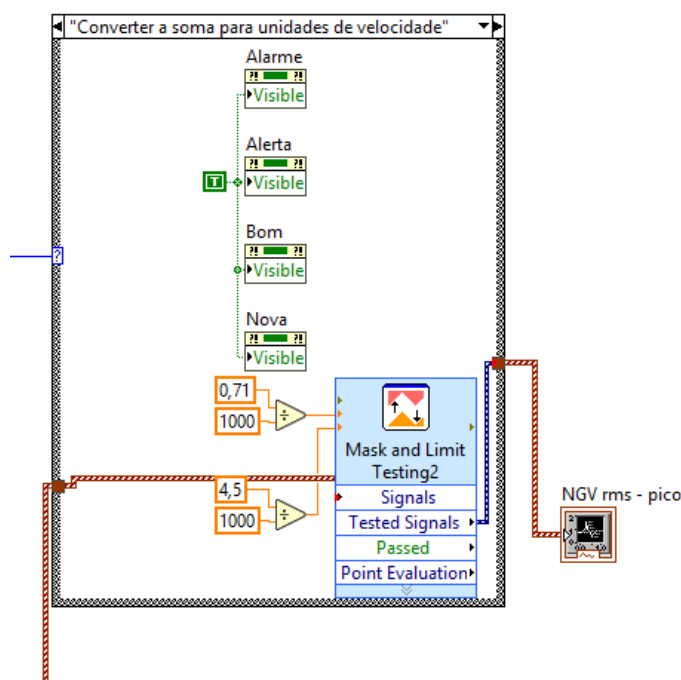


Figura 43 - Determinação de limites de velocidades baseado na norma ISO 10816 - parte 3

Também foi criado um bloco que ilustra no painel frontal os níveis de alerta para a evolução do nível global tal como se ilustra na Figura 44, em que ao se adquirir o sinal, este é comparado com um banco de dados com valores padronizados, dentro dos limites estabelecidos pela Norma ISO 10816, retornando uma mensagem de status ou alarme ao usuário.

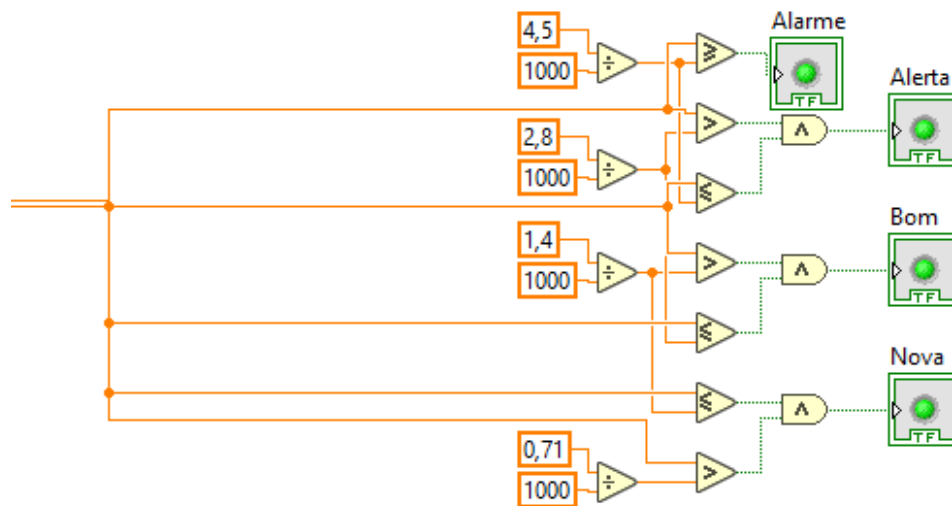


Figura 44 - Níveis de alerta para a evolução do nível global

Para os diferentes níveis de alerta acende uma luz de aviso. Quando uma luz acende, a outra apaga-se no mesmo instante. A seguir ilustra-se na Figura 45 uma representação do diagrama frontal desta parte da aplicação em que foram acesos todos os níveis de alerta para uma correta visualização neste relatório.

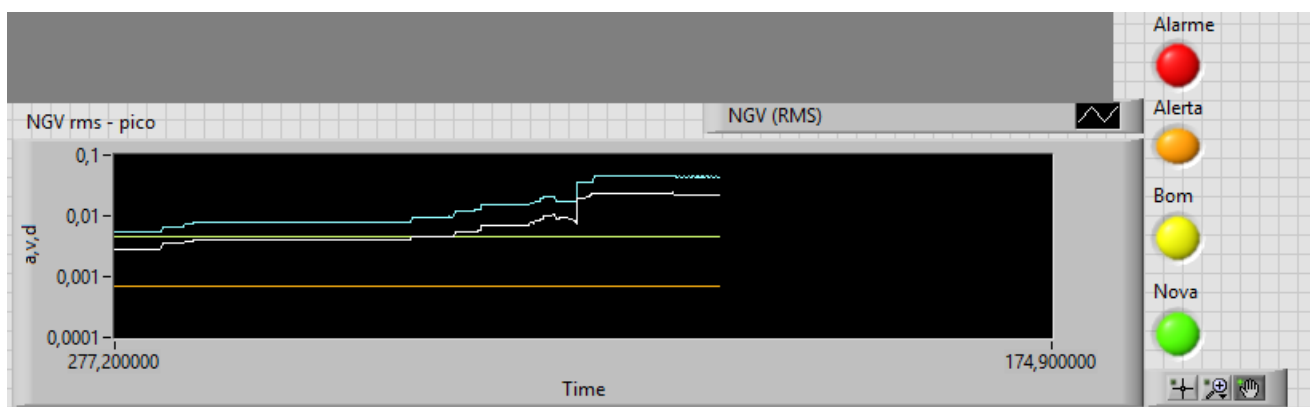


Figura 45 - Nível global de vibração com os respectivos níveis de alerta

Na Tabela 3 sugere-se patamares de velocidade de vibração para quatro zonas de avaliação da vibração para diferentes classes de máquinas, classificadas de acordo com a potência:

Tabela 3 - Valores de severidade de vibração sugeridos na norma ISO 10816-3

Velocidade de vibração [mm/s] (RMS)	<15 KW Classe I	15 KW ≤ P ≤ 75 KW Classe II	P > 75 KW (base rígida) Classe III	P > 75 KW (base flexível) Classe IV	
0.28	A				
0.45					
0.71	B	A	A	A	
1.12		B			
1.8					
2.8	C	B	B		
4.5					
7.1	D	C	C	B	
11.2		D		D	C
18			D		D
28					
45		D			

A Tabela 4 explica o significado das letras A, B, C e D que dizem respeito a amplitude de vibração.

Tabela 4 - Zonas de avaliação da severidade de vibração segundo a norma ISO 10816-1

Zona	Descrição
A	Máquinas recém fornecidas.
B	Vibração considerada aceitável para operação sem restrições.
C	Vibração considerada inaceitável para operação contínua. Geralmente, a máquina pode operar por um período limitado, até uma oportunidade de correção do problema.
D	Vibração considerada suficiente para causar danos à máquina.

# 3 Parte experimental

O trabalho experimental incide sobre a medição e análise de vibrações num simulador de avarias, tal como se ilustra na Figura 46, disponível no laboratório de mecânica estrutural do DEMI da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

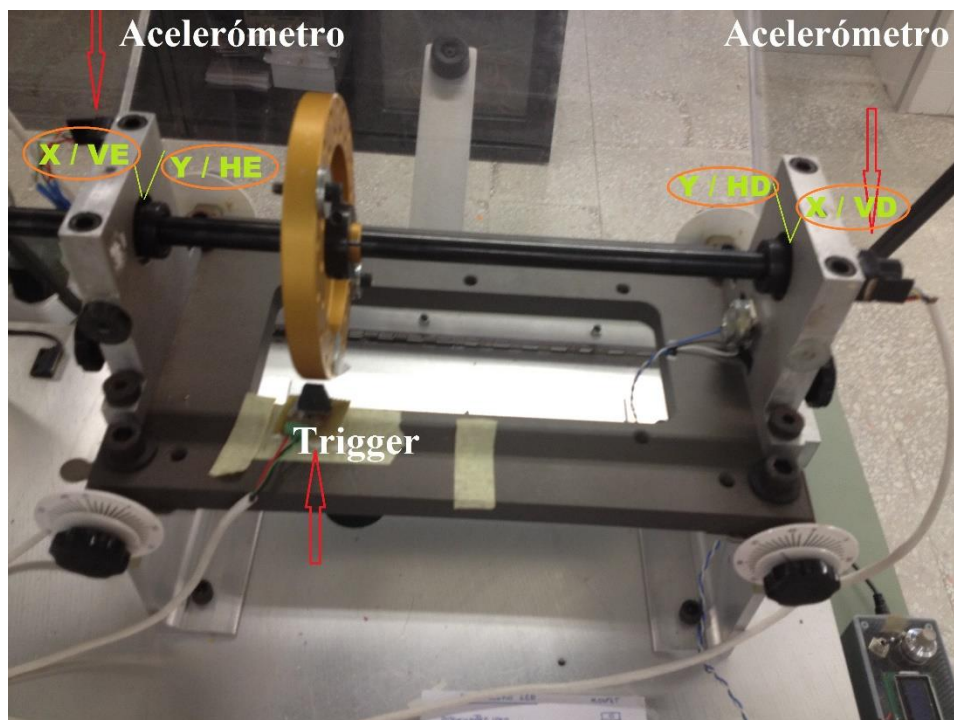


Figura 46 - Simulador de falhas – Laboratório de Mecânica Estrutural da FCT

## 3.1 Sensores de vibração (acelerómetros)

Um acelerómetro é um instrumento capaz de medir a aceleração de um sistema num determinado ponto e direção.

O acelerómetro que se usa no decorrer deste trabalho é o sensor MEMS triaxial ADXL335 nas direções x(vertical) e y(horizontal) de acordo com a Figura 47. A aplicação deste tipo de sensores é ainda pouco explorada na aquisição de sinais em ambiente industrial e tem como grande vantagem permitir reduzir de forma significativa o custo com instrumentação.

Este tipo de acelerómetro tem o circuito descoberto, tal como se ilustra na Figura 47.



Figura 47 - Acelerómetro MEMS triaxial ADXL335

A montagem dos acelerómetros nos apoios do equipamento é feita com as seguintes orientações:

- X: vertical para cima
- Y: horizontal para a esquerda
- Z: axial

A calibração dos acelerómetros foi feita para os sensores vertical e horizontal utilizando um algoritmo para a aceleração de gravidade em  $m/s^2$ . A Figura 48 ilustra o algoritmo utilizado.

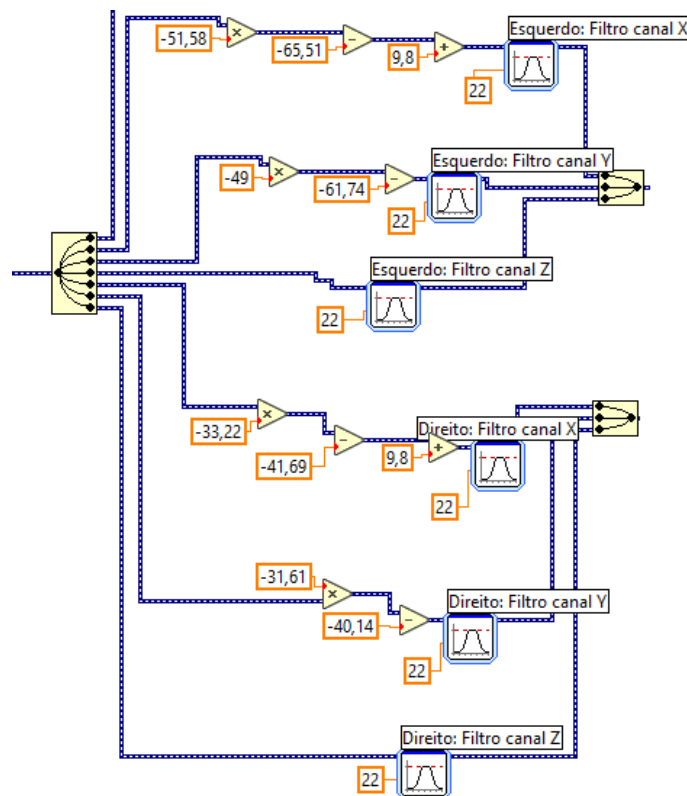


Figura 48 - Algoritmo usado para a calibragem dos acelerómetros vertical (X) e horizontal (Y)

Devido a disposição dos acelerómetros no equipamento, ao sensor vertical teve que se retirar a componente gravítica para colocar os gráficos vertical e horizontal a zeros.

### 3.2 Montagem da placa de aquisição

A placa de aquisição (Figura 49) da *National Instruments* foi montada tendo em conta o modelo 6008 pinout ilustrada na Figura 50.



Figura 49 - Placa National Instruments

A Figura 50 ilustra o pinout da placa 6008.

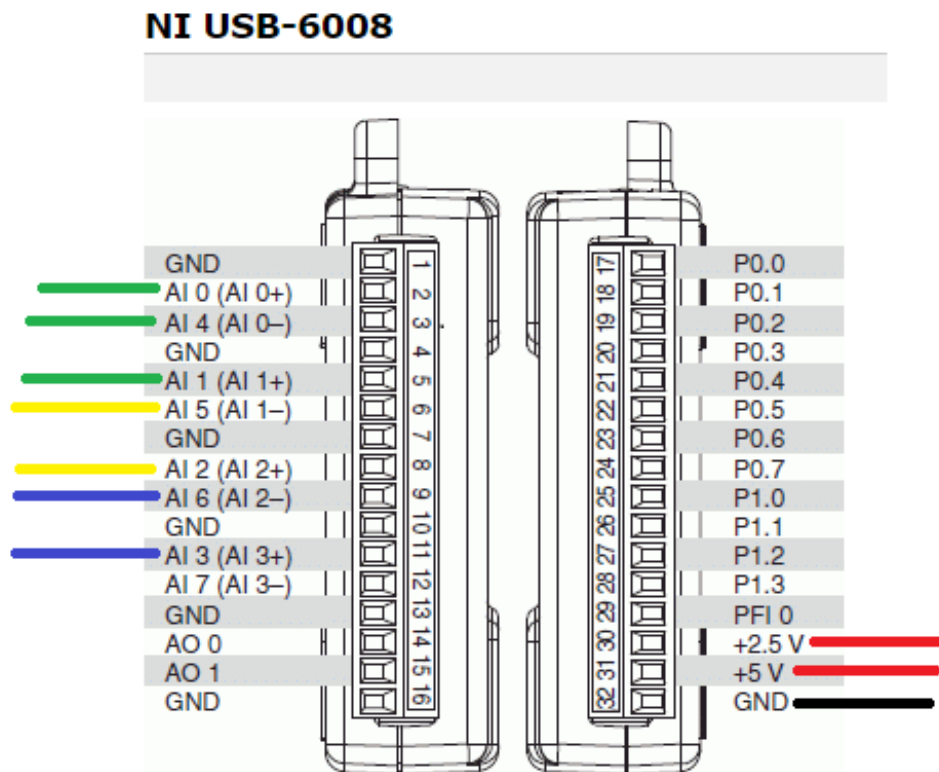


Figura 50 - National Instruments USB 6008 pinout utilizado

Esta placa tem a vantagem de alimentar os sensores, tornando o sistema auto-suficiente.

### 3.3 Montagem do trigger

O trigger (Figura 51) é um detetor de fase que já se encontra montado e disponível no laboratório. Este detetor funciona com um sensor com dois feixes que à passagem de uma fita refletora regista um pico de amplitude, permitindo através da medição do tempo entre picos determinar a velocidade de rotação do equipamento. A partir deste sinal, com a identificação do tempo a que ocorre esse pico é possível calcular a fase. Este detetor é usado como sendo a referência para se poder determinar a diferença de fase com os acelerómetros.

A Figura 51 ilustra o trigger utilizado, em que o fio vermelho é referente aos 5V, o fio preto é referente ou GND e o fio verde é referente ao OUT.

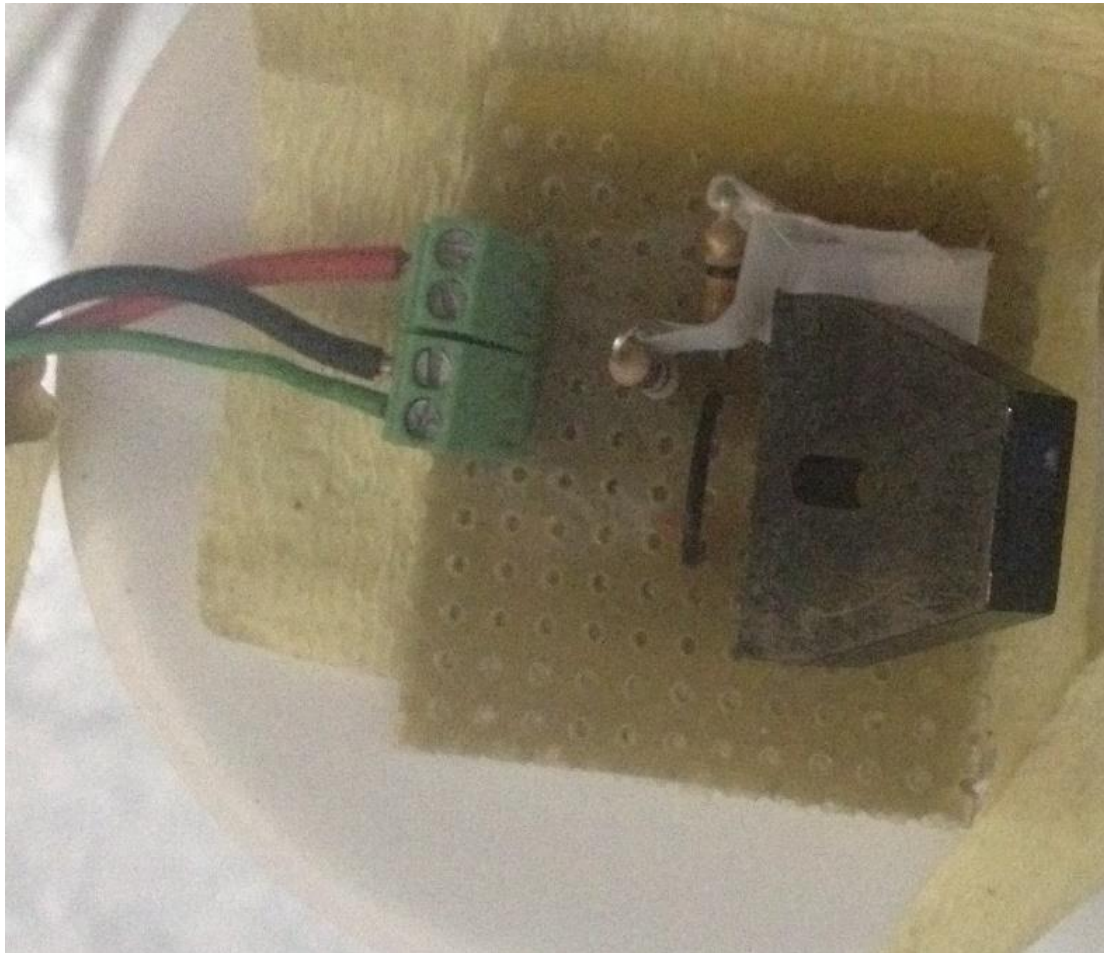


Figura 51 – Trigger/ detetor de fase

### 3.4 Suporte para os acelerómetros

Sabe-se estes acelerómetros estão sujeitos ao desgaste (porque o circuito está descoberto e exposto) devido as condições adversas, tendo em conta que os acelerómetros precisam ser fixados ao apoio do equipamento rotativo, pode existir a necessidade de analisar um outro equipamento com os mesmos acelerómetros. Neste caso pensou-se no desgaste que se gera ao colar e descolar um acelerómetro diretamente a um equipamento e para além disso essa cola deixa resíduos que precisam ser retirados do acelerómetro (correndo este o risco de se tornar inútil ou alterar as condições de funcionamento).

Para amenizar as consequências deste risco desnecessário a que se submetia cada acelerómetro, pensou-se num suporte para os acelerómetros MEMS triaxiais que são utilizados neste trabalho que foi desenhado no *Solidworks*. Este suporte é fácil de montar ou fixar em diferentes equipamentos e permite o alinhamento dos eixos do sensor com os do equipamento a monitorizar.

O suporte ilustrado na Figura 52 foi impresso na impressora 3D disponível no laboratório de tecnologia industrial do DEMI.

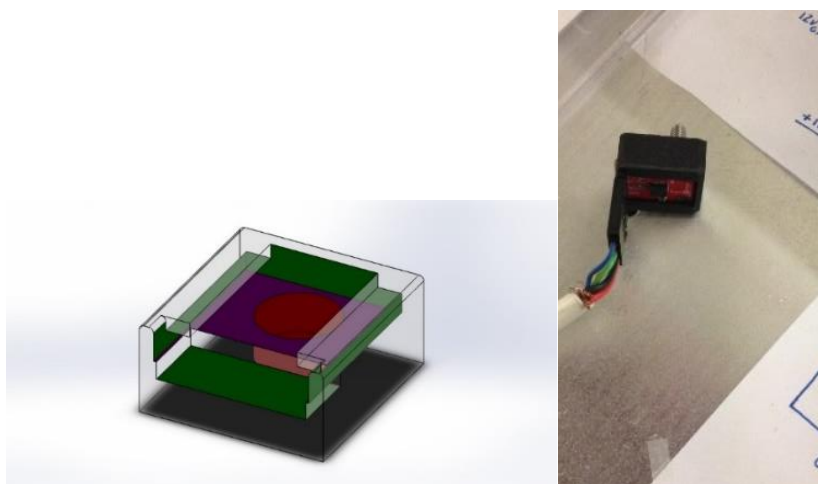


Figura 52 - Suporte para o acelerómetro

Este suporte tem um furo passante para um parafuso M4 e espaço suficiente para não existir contato entre o acelerómetro e o parafuso para o caso de o operador optar por uma ligação roscada.

As dimensões internas do suporte garantem uma boa folga entre o mesmo e o que nele se monta.

### 3.5 Criação do software (DAQ)

O software para a aquisição de dados foi criado de modo a que os valores de amplitude de cada um dos três canais apareçam nos gráficos individualmente para cada acelerómetro e para o Trigger.

Estes valores dos acelerómetros são amostrados em volts, existindo assim a necessidade de uma calibração de cada canal. Como não se sabe o valor da sensibilidade dos acelerómetros, calibrou-se cada canal tendo em conta a aceleração de gravidade. Para uma correta calibração, teve que se posicionar o acelerómetro numa superfície completamente parada e calcular a constante para cada

canal que se procura de modo a que a aceleração de gravidade seja apresentada em  $m/s^2$  tal como se ilustra na Figura 53.

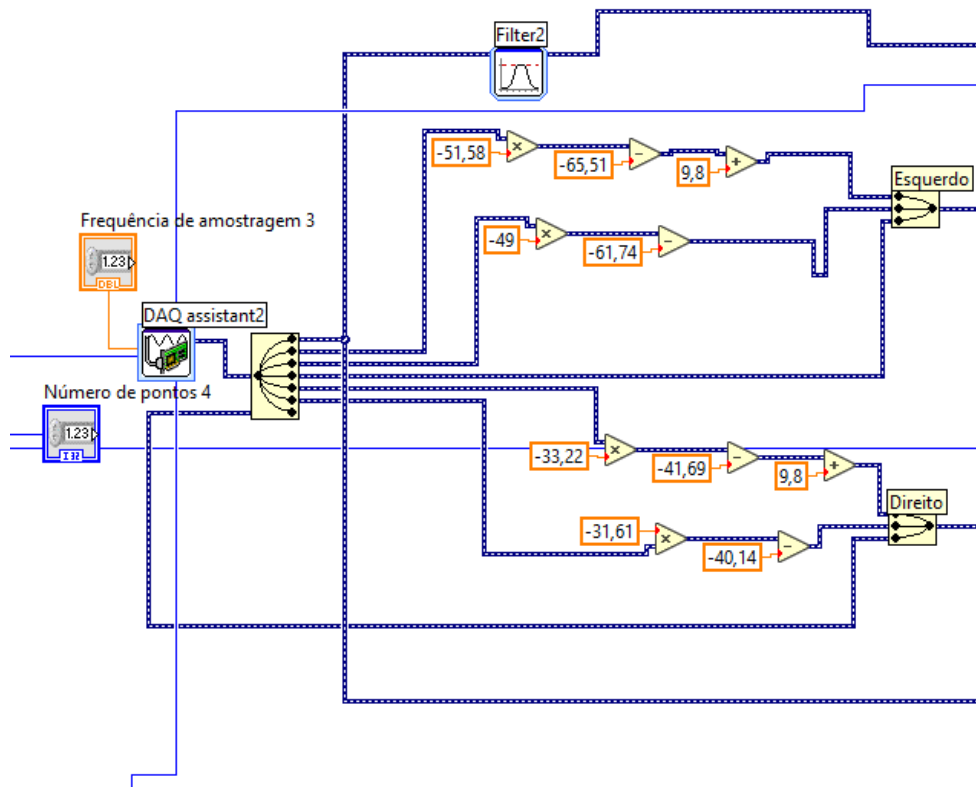


Figura 53 – Calibração dos canais dos acelerómetros

Para o Trigger foi necessário introduzir um filtro passo alto com uma frequência de corte de 2Hz para permitir verificar melhor o sinal.

O sinal em cada canal é tratado com exatamente a mesma aplicação criada para a simulação, à exceção do sinal do trigger que é apenas apresentado o seu espetro de frequência.

Para uma fácil compreensão, é importante frisar que à aplicação da simulação foi acoplada a parte da aquisição de dados permitindo ao operador tal como se ilustra na Figura 54 se questionar se pretende simular ou adquirir sinal e assim prosseguir da mesma forma que foi explicado anteriormente na secção 2.10.



Figura 54 - Bloco: simulação ou aquisição

Para melhorar a interface com o utilizador (em termos de organização) e para qualquer pessoa que entenda minimamente a matéria conseguir perceber o funcionamento da aplicação acoplada (simulação/ aquisição) teve-se que adaptar tudo desde o início para minimizar o número de gráficos e botões.

Deste modo, existem botões e gráficos que são necessários para a aquisição e não para a simulação e vice-versa. Estes se tornam invisíveis quando não são necessários.

### 3.6 Equilibragem

Para uma correta e eficiente equilibragem dinâmica deve-se perceber que a escolha da velocidade de rotação é muito importante, pois uma velocidade muito alta pode desconfigurar a linearidade da resposta do rotor. Então escolheu-se uma frequência de rotação de 20Hz.

O objetivo de qualquer método de equilibragem é reduzir o desequilíbrio do rotor para zero, mas na prática isto não acontece porque existem outros fatores que causam o aumento da amplitude a 1RPM tais como folgas associadas aos elementos da máquina complexa. E o método a utilizar neste trabalho é a metodologia multiponto, pois, segundo Roque e Silva, 2013 é um método que apresenta globalmente melhores resultados em relação à metodologia tradicional sem ser necessário selecionar previamente um ponto de medida.

A expressão para o cálculo do ângulo de fase de cada sensor em relação ao referencial é dada por

$$\theta = 360 \times \frac{t_{\text{sensor}} - t_{\text{trigger}}}{T} \quad (16)$$

A proposta desta parte do trabalho é fazer a equilibragem no LabView num plano com os 4 sensores disponíveis de forma a otimizar pelo método dos mínimos quadrados a melhor solução de massa de correção e ângulo de posição apenas com duas leituras, em que a primeira (leitura k) é referente a situação do rotor no estado inicial apenas com a massa de desequilíbrio (que na prática é desconhecida) e a segunda (leitura k+1) é referente a situação do rotor com a massa de teste adicionada na posição da fita refletora (ângulo zero) e por fim a leitura com a massa corretora adicionada.

Segundo Roque e Silva, 2008, o efeito da adição de massa é dado por uma matriz  $C_k$  que tem em conta o número de sensores e de planos disponíveis e que no limite a equilibragem num plano deve ter associado um sensor. Neste caso de estudo, a matriz  $C_k$  é dada por

$$C_k = \begin{bmatrix} C_{11} \\ C_{21} \\ C_{31} \\ C_{41} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\Delta V_{11}}{\Delta m_1} \\ \frac{\Delta V_{21}}{\Delta m_1} \\ \frac{\Delta V_{31}}{\Delta m_1} \\ \frac{\Delta V_{41}}{\Delta m_1} \end{bmatrix} \quad (17)$$

Considerando dois sensores com dois canais cada e apenas um plano de equilibragem, onde o índice k diz respeito ao número de leituras.

Escrevendo as leituras à custa de valores complexos, o cálculo da massa de correção é calculado com base na pseudo-inversa da matriz descrita na equação (17), que é dada pela expressão que se segue:

$$\bar{m}_c^K = (\bar{C})^+ \bar{V}_K \quad (18)$$

E desta forma também é possível fazer uma previsão do resultado de equilibragem pela seguinte expressão:

$$\bar{V}_{K+1} = \bar{V}_K + \bar{C} \bar{m}_c^K \quad (19)$$

Pretende-se equilibrar através da adição de massa, e, portanto, explica-se a seguir os procedimentos e apresenta-se os resultados obtidos durante esta fase do trabalho. Na aplicação de equilibragem, as leituras são todas feitas nos gráficos em amplitude de deslocamento.

Para o algoritmo criado existem duas situações. A parte 3.6.1 retrata o caso em que a amplitude da segunda leitura aumenta relativamente a primeira, e a parte 3.6.2 retrata o caso em que a amplitude da segunda leitura diminui relativamente a primeira.

Depois na parte 3.6.3 é feita uma verificação dos resultados do processo de equilibragem utilizando o coletor de dados ENPAC.

### 3.6.1 APLICAÇÃO: Caso em que a amplitude da segunda leitura aumenta relativamente a primeira leitura:

**1ª leitura:** inicialmente mede-se a vibração de um equipamento que se julga desequilibrado. No caso de estudo foi colocada uma massa de desequilíbrio de 24.79 gramas no maior raio possível a 40 graus da fita refletora no sentido contrário ao sentido de rotação, tal como se ilustra na Figura 55. Isto para se poder fazer a primeira leitura da amplitude e fase.

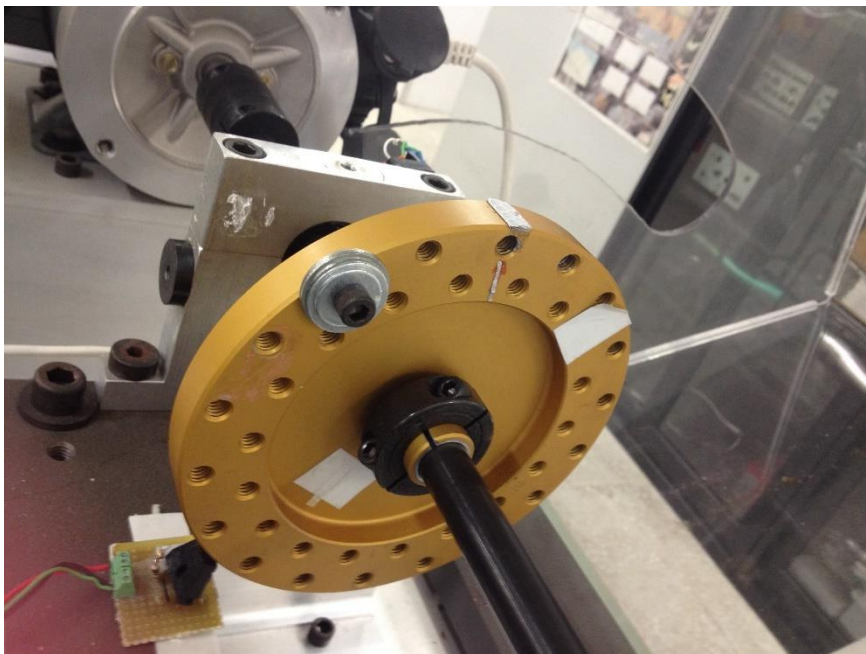


Figura 55 - Primeira leitura

**2ª leitura:** de seguida adicionou-se uma massa de teste de 19 gramas a zero graus (no ponto de referência, ou seja, posição da fita refletora) e fez-se a segunda leitura (amplitude e fase). A massa de teste foi colocada no raio mais afastado do disco para não haver necessidade de utilizar uma massa de teste muito pesada, tal como se ilustra na Figura 56.



Figura 56 - Segunda leitura

**Resultados:** feitas estas duas leituras, registou-se os valores das duas leituras e do valor da massa de teste no algoritmo criado à parte na aplicação, e obteve-se o vetor massa de correção, tal como se ilustra na Figura 57. Este algoritmo foi criado com recurso ao Mathscript (disponível no software LabView) para calcular a massa e ângulo de correção de forma otimizada tendo em conta a informação dos quatro sensores em simultâneo.

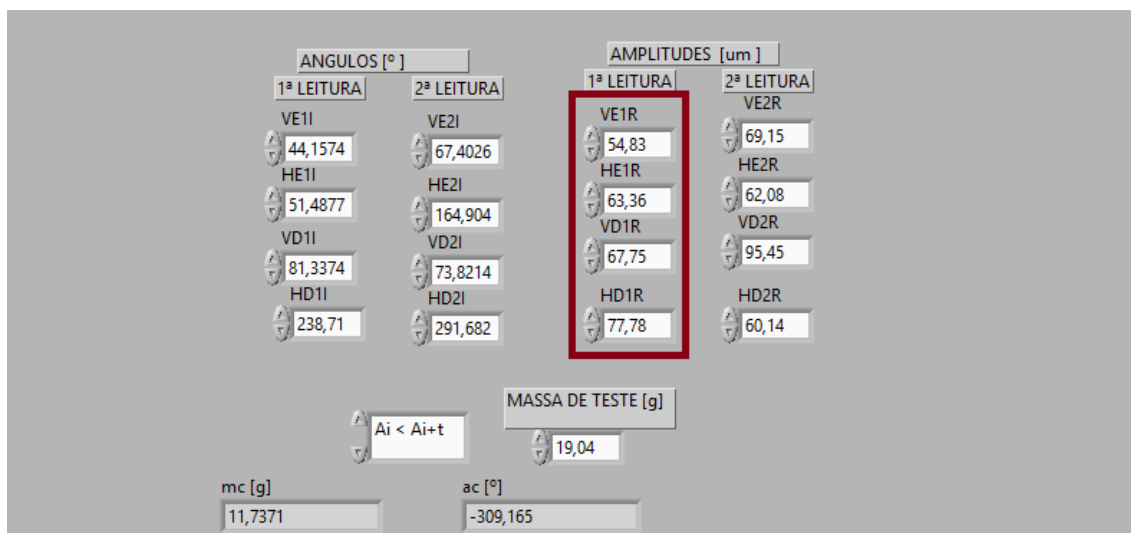


Figura 57 – Leituras de amplitude e fase, e vetor massa de correção

A desfasagem entre as direções vertical e horizontal não é verificável nos dois acelerómetros, isto tem haver com a não estabilidade do sinal no domínio temporal e consequentemente do ângulo de fase. O sensor HE e HD não produziram resultados menos satisfatórios em termos de amplitude (o que pode ter haver com o fato do equipamento vibrar mais na horizontal), e tal como mostrou na Figura 57, a adição da massa de teste não produziu um aumento de amplitude nestes sensores, uma vez que a massa de teste foi colocada próxima da massa de desequilíbrio. Nas duas leituras

houve uma variação de amplitude de aproximadamente 30%, a exceção do sensor HE. A massa de teste utilizada pode ser muito pesada e poderia se escolher uma massa menos pesada para reduzir este efeito.

Este método de equilibragem para este caso, resultou numa massa de correção de aproximadamente 12 gramas e um ângulo de 309 graus no sentido contrário ao sentido de rotação.

O vetor da massa de correção resultante desta operação, está ilustrado na Figura 58.

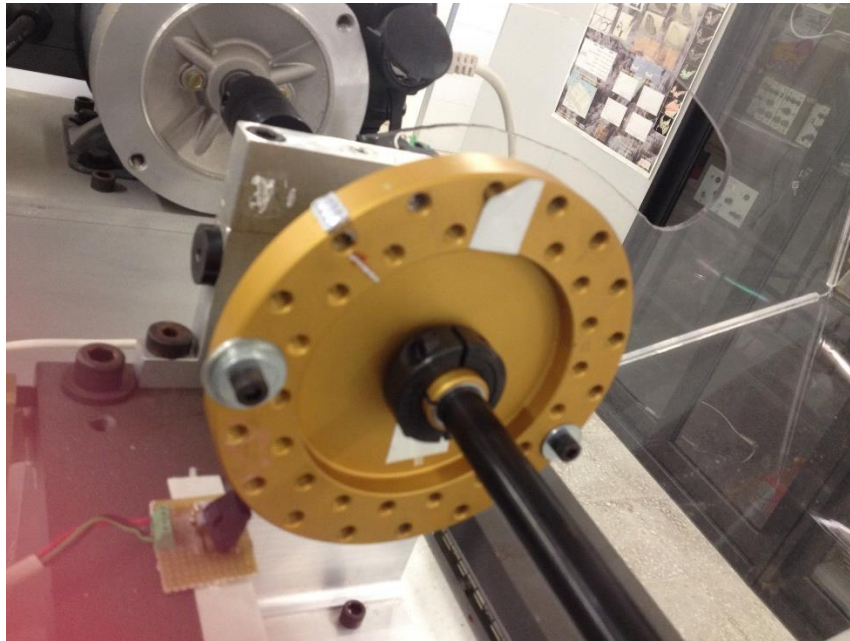


Figura 58 – Correção

### Redução:

Apresenta-se a seguir os resultados obtidos com os dados recolhidos com a aplicação criada para a Equilibragem.

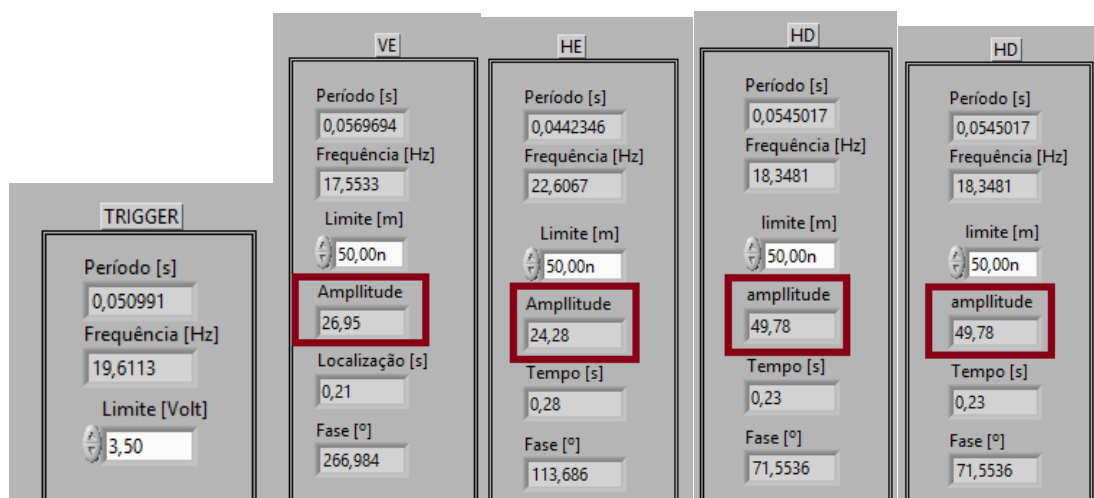


Figura 59 - Resultados

Comparando a amplitude da 1ª leitura da Figura 57 e a redução de amplitude após a correção da Figura 59, pode-se notar que houve uma boa redução de amplitude.

A massa de correção produziu uma redução de amplitude maior no acelerómetro esquerdo (que está mais próximo do rotor), tal como se pode verificar na Tabela 5.

Tabela 5 - Redução de amplitude

SENSOR	Redução de amplitude
VE	51%
HE	62%
VD	27%
HD	36%

### 3.6.2 APLICAÇÃO: Caso em que a amplitude da segunda leitura diminui relativamente a primeira leitura:

**1ª leitura:** inicialmente mede-se a vibração de um equipamento que se julga desequilibrado. No caso de estudo foi colocada uma massa de desequilíbrio de 24.79 gramas no maior raio possível a 140 graus da fita refletora no sentido da rotação, tal como se ilustra na Figura 60.



Figura 60 - Primeira leitura

**2ª leitura:** de seguida adicionou-se uma massa de teste de 19 gramas a zero graus (no ponto de referência, ou seja, posição da fita refletora) e fez-se a segunda leitura (amplitude e fase). A massa de teste foi colocada no raio mais afastado do disco para não haver necessidade de utilizar uma massa de teste muito pesada, tal como se ilustra na Figura 61.

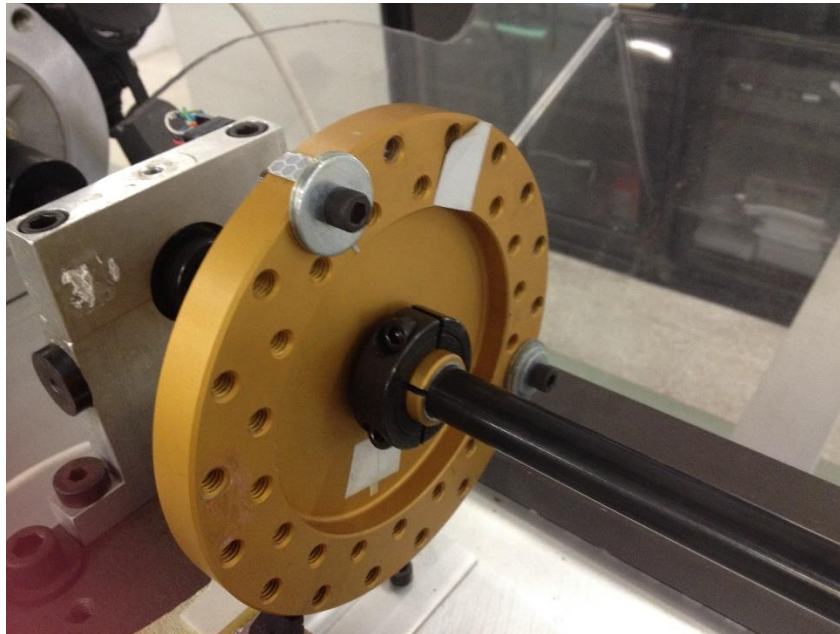


Figura 61 - Segunda leitura

**Resultados:** feitas estas duas leituras, registou-se os valores das duas leituras e do valor da massa de teste no algoritmo criado à parte na aplicação, e obteve-se o vetor massa de correção, tal como se ilustra na Figura 62.

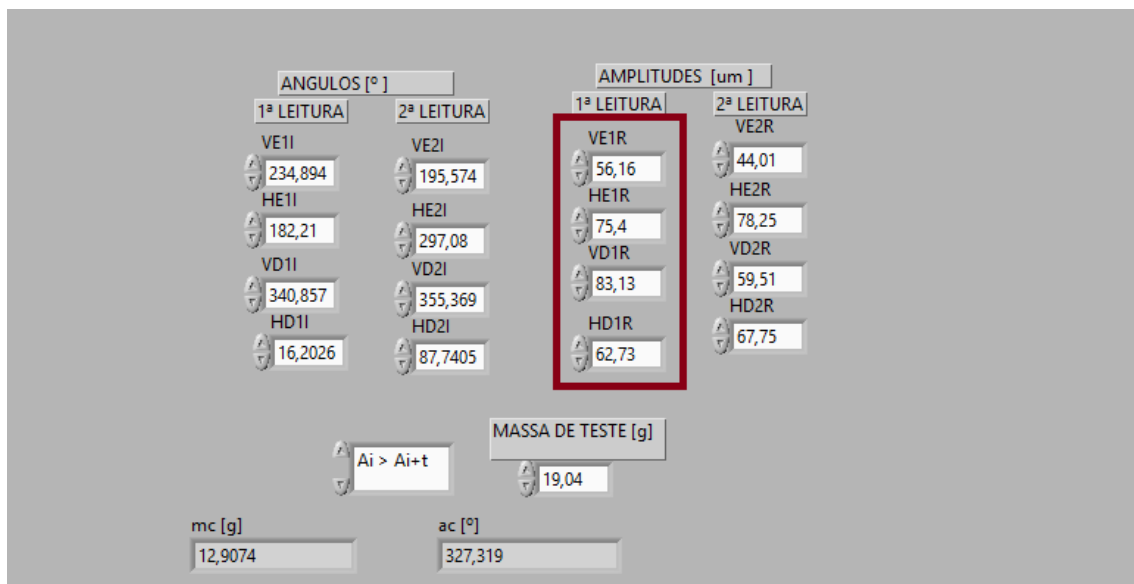


Figura 62 - Leituras de amplitude e fase, e vetor massa de correção

A desfasagem entre as direções vertical e horizontal não é verificável nos dois acelerómetros, isto tem haver com a não estabilidade do sinal no domínio temporal e consequentemente do ângulo de fase. O sensor HE e HD não produziram resultados menos satisfatórios em termos de amplitude (o que pode ter haver com o fato do equipamento vibrar mais na horizontal), e tal como mostrou na Figura 62, a adição da massa de teste não produziu uma diminuição de amplitude nestes

sensores, uma vez que a massa de teste foi colocada próxima da massa de desequilíbrio. Nas duas leituras houve uma variação de amplitude de aproximadamente 30%, a exceção do sensor HE. A massa de teste utilizada pode ser muito pesada e poderia se escolher uma massa menos pesada para reduzir este efeito.

Este método de equilibragem para este caso, resultou numa massa de correção de aproximadamente 13 gramas e um ângulo de 327 graus no sentido de rotação.

O vetor da massa de correção resultante desta operação, está ilustrado na Figura 63.

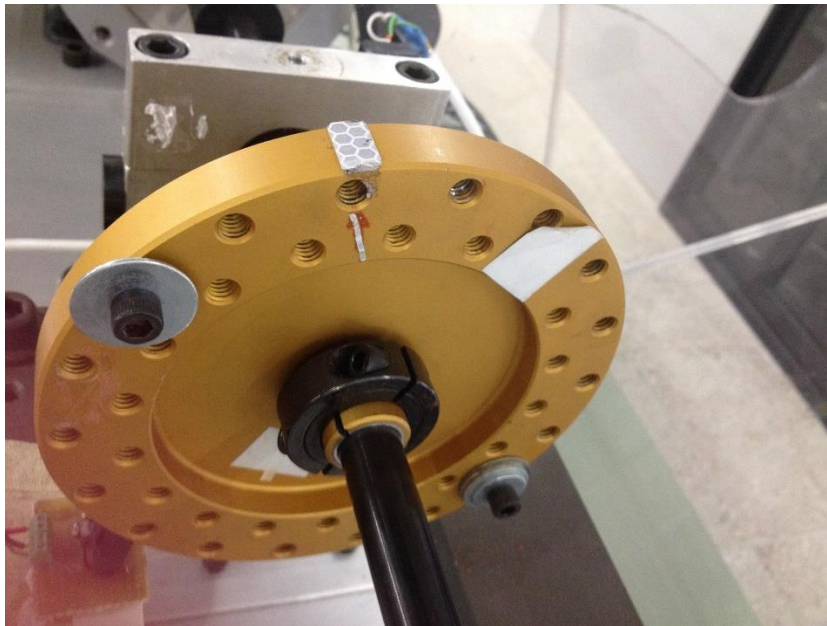


Figura 63 - Correção

**Redução:**

Apresenta-se a seguir os resultados obtidos com os dados recolhidos com a aplicação criada para a Equilibragem.

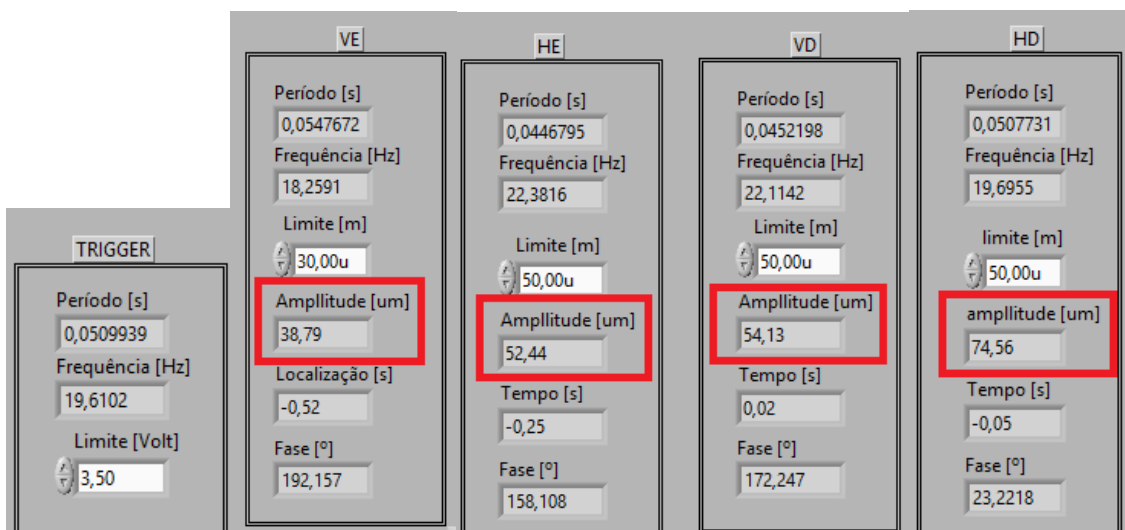


Figura 64 - Resultados

Comparando a amplitude da 1ª leitura da Figura 62 e a redução de amplitude após a correção da Figura 64, pode-se notar que houve uma boa redução de amplitude.

A massa de correção produziu uma redução de amplitude maior no acelerómetro direito, à excessão do sensor horizontal que aumentou a amplitude, o que pode ter haver com o fato da vibração neste sensor ser maior. Tal como se pode verificar na Tabela 6.

Tabela 6 - Redução de amplitude

SENSOR	Redução de amplitude
VE	31%
HE	30%
VD	35%
HD	-19%

### 3.6.3 Verificação dos resultados: Coletor de dados ENPAC

Nas mesmas condições da recolha de dados com a aplicação, são recolhidos os dados com o coletor de dados *ENPAC da Allen-Bradley*. Este coletor de dados é eficiente e tem a mesma funcionalidade que a aplicação criada (proceder com a equilibragem), mas a aplicação tem a vantagem de poder ser adaptada e reprogramada à medida das necessidades do utilizador.

Como este processo de equilibragem é feito num plano, este tem a ele associado apenas um sensor. O que significa que para cada adição de massa ao rotor e para cada leitura de cada um dos quatro sensores, deve-se alterar o ponto de medição.

É importante referir que o trigger utilizado para este ensaio foi o trigger do coletor ENPAC.

A Figura 65 ilustra os pontos de leitura do coletor de dados.

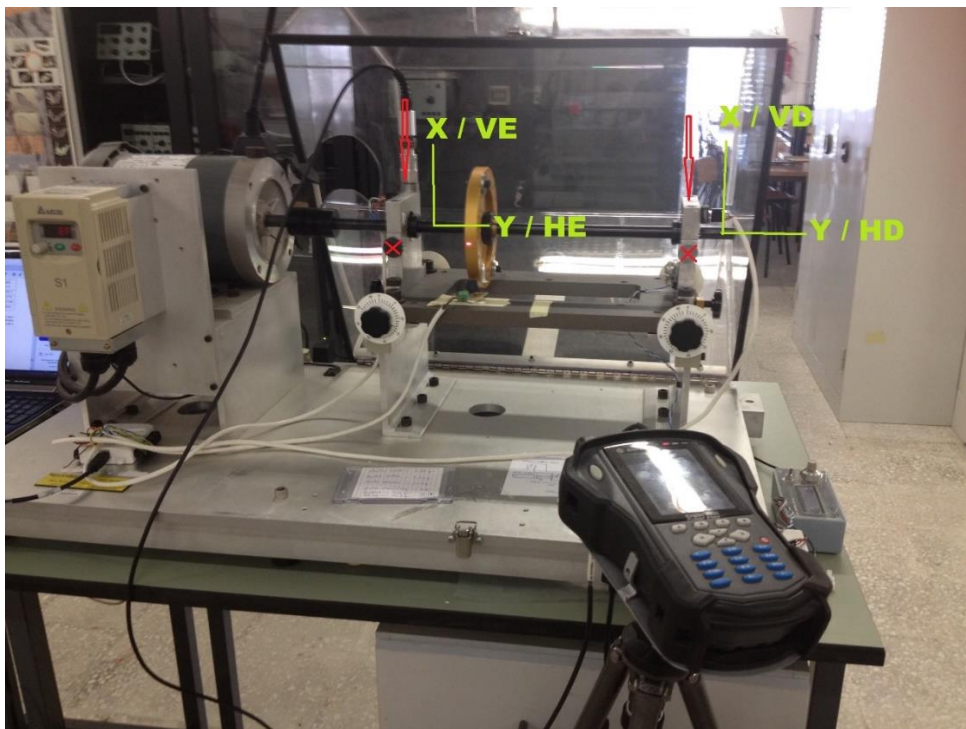


Figura 65- Pontos de leitura do transdutor com o coletor de dados *ENPAC*

Durante as medições pude perceber que a amplitude de vibração é maior do outro lado do apoio, de acordo com a Figura 65. Esta diferença de amplitude pode ser devido a uma maior vibração do outro lado originado por uma folga maior em relação a outro lado do equipamento que tem a amplitude menor.

A Tabela 7 apresenta os valores das leituras feitas sensor a sensor, para cada uma das quatro direções em separado e os respectivos valores de massa de correção e amplitude final.

Tabela 7 - Resultados obtidos pelo coletor de dados ENPAC (sensor a sensor)

Sensor	$\vec{A}_t$ [um $\angle$ °]	$\vec{m}_t$ [g $\angle$ °]	$\vec{A}_{t\pm T}$ [um $\angle$ °]	$\vec{m}_c$ [g $\angle$ °]	$\vec{A}_{final}$ [um $\angle$ °]
<b>VE</b>	52.20 $\angle$ 209	19.04 $\angle$ 0°	109.00 $\angle$ 217	17.40 $\angle$ 166	6.02 $\angle$ 195
<b>HE</b>	16.60 $\angle$ 195		33.10 $\angle$ 208	16.60 $\angle$ 140	10.00 $\angle$ 205
<b>VD</b>	53.80 $\angle$ 208		114.00 $\angle$ 215	16.70 $\angle$ 166	5.97 $\angle$ 203
<b>HD</b>	28.00 $\angle$ 165		66.10 $\angle$ 184	12.90 $\angle$ 146	16.60 $\angle$ 223

O coletor de dados ENPAC também mostra que os sensores vertical e horizontal apresentam uma diferença de fase diferente de 90 graus, o que quer dizer que este equipamento não está apenas desequilibrado.

A Tabela 8 apresenta os valores da percentagem de redução da amplitude de vibração em cada sensor após equilibragem.

Tabela 8 - Redução de amplitude (pelo coletor de dados ENPAC)

SENSOR	REDUÇÃO DE AMPLITUDE
<b>VE</b>	88%
<b>HE</b>	40%
<b>VD</b>	89%
<b>HD</b>	41%

Houve uma boa redução de amplitude para cada um dos sensores, e neste caso a maior redução acontece no sensor vertical direito (na posição mais afastada do rotor).

Mas a grande desvantagem é que uma boa redução utilizando um sensor, não é a melhor redução nos restantes sensores. Este coletor não permite realizar uma equilibragem do ponto de vista de otimização, ou seja, comparativamente à aplicação criada, o algoritmo do coletor ENPAC não faz a equilibragem tendo em conta toda a informação das quatro leituras em simultâneo, apenas tem em conta a informação sensor a sensor.



# 4 Conclusões e proposta de trabalhos futuros

Este trabalho não só contribui para uma melhor compreensão da manutenção baseada na condição e processamento de sinais como também ajuda a perceber a relevância que este tema tem para a indústria, gerando a cada bibliografia consultada muito entusiasmo por poder posteriormente implementar os conhecimentos adquiridos no ramo profissional.

A aplicação criada para simular ou adquirir sinal foi pensada tendo em conta exemplos simples como funções sinusoidais que são cálculos simples e manualmente verificáveis para garantir a funcionalidade da aplicação. Esta aplicação foi pensada também para fins didáticos durante os próximos anos, pois nós enquanto alunos poderemos ter uma noção mais clara de alguns fenómenos que ocorrem no processamento de sinal e análise de vibrações (e não só) de que só ouvimos falar teoricamente, principalmente numa fase inicial do curso em que ainda não se tem o domínio sob alguns softwares de simulação. Podendo ainda ter a possibilidade de se simular determinadas situações e comprovar com exemplos mais práticos.

Esta aplicação foi criada para o equipamento rotativo do laboratório do DEMI (mecânica estrutural), mas está em aberto para ser utilizada em outros equipamentos rotativos.

Para uma correta monitorização de vibrações, segundo a Norma ISO 10816-3 as medições foram feitas em duas direções (horizontal e vertical) com dois sensores. A Norma ISO 10816 é composta por várias partes, cada uma dedicada a um tipo de máquina, com tabelas de valores-limite de velocidade fazendo a distinção entre vibração aceitável (verde), vibração excessiva (amarela), e vibração que irá causar danos se não for reduzida (vermelha).

O processo de equilibragem foi o processo mais desafiante, uma vez que inicialmente não apresentou resultados confiáveis relativamente a massa de correção e nem à frequência de rotação de referência devido a um algoritmo de calibração não apropriado, e por isso esta parte exigiu muito mais trabalho e sucessivas repetições das experiências. Devido ao efeito do ruído teve que se filtrar o sinal com um filtro passa-baixo que apenas deixa passar frequências a baixo de 22Hz, ou seja, 2Hz acima da frequência de rotação, isto para que o sinal dos acelerómetros se possa aproximar ao máximo de uma função sinusoidal por forma a permitir detetar a fase do sinal adquirido relativamente ao de referência.

Os objetivos até aqui pretendidos foram alcançados, mas com limitações. Para o cálculo do ângulo de fase em relação à referência na aplicação pôde-se perceber que os ângulos medidos não são estáveis. Ou seja, fatores relacionados com o ruído, instabilidade da mesa, uma possível pequena inclinação dos eixos do acelerómetro, provavelmente um desalinhamento, folgas, entre outros não permitiram obter sinais perfeitamente sinusoidais. Mas ainda assim, o algoritmo criado permitiu reduzir a amplitude de vibração com a massa de correção.

Sendo este um trabalho pioneiro, sugere-se algumas propostas de trabalhos futuros:

- Os valores apresentados relacionados com a fase são um desafio e uma possível primeira proposta para um trabalho futuro. Esta proposta de um trabalho futuro, é dada tendo em conta que o bloco detetor de picos à saída do canal em domínio temporal faz a leitura dos valores dos instantes dos picos na referência e nos sensores, mas nada garante que esta leitura é sempre feita exatamente no pico do sinal original. Uma sugestão é pensar

neste algoritmo partindo do princípio que a defasagem entre o sensor vertical e horizontal de um canal deve ser de  $90^\circ$  se o equipamento estiver apenas desequilibrado.

- Uma segunda proposta de trabalho seria a automatização do algoritmo para a equilibragem multiponto com recurso a um outro software que permita armazenar os valores das leituras feitas, e preencher esses valores nos dados de entrada do algoritmo.
- Uma terceira e última proposta de trabalho seria a possibilidade de criar outros algoritmos para corrigir outros tipos de defeitos típicos de elementos rotativos, uma vez que este algoritmo apenas corrige o desequilíbrio.

# 5 Bibliografia

- [1] AGNIESZKA (AGNES) MUSZYN´SKA, “Rotordynamics,” CRC Press (20 May 2005), p. 1128, 2005.
- [2] A. V OPPENHEIM, R. W. SCHAFER, AND J. R. BUCK, *Discrete Time Signal Processing*, vol. 1999. 1999.
- [3] BERGLAND, G. D. 1969. “A Guided Tour of the Fast Fourier Transform.” *IEEE Spectrum* 6 (7): 41–52. doi:10.1109/MSPEC.1969.5213896.
- [4] C. E. SHANNON, "Communication in the presence of noise", *Proc. Institute of Radio Engineers*, vol. 37, no.1, pp. 10–21, Jan. 1949. Reprint as classic paper in: *Proc. IEEE*, Vol. 86, No. 2, (Feb 1998)
- [5] C. J. KALKMAN, “LabVIEW: A software system for data acquisition, data analysis, and instrument control,” *Journal of Clinical Monitoring* , vol. 11, no. 1, pp. 51–58, 1995.
- [6] R. L. ALLEN AND D. W. MILLS, “Frontmatter,” in *Signal Analysis*, Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2003, pp. i–xxi.
- [7] Departamento de Ingenieria Mecánica, Energética y de Materiales. 2007. “Vibraciones En Máquinas: Mantenimiento Predictivo.” *Elementos de Máquinas Y Vibraciones.*, 1–54. doi:10.1017/CBO9781107415324.004.
- [8] E. C. IFEACHOR AND B. W. JERVIS, “Digital Signal Processing - A Pratical Approach,” Addison-Wesley, 1993.
- [9] Ferreira, Silvestre José da Silva, *Diagnóstico de Máquinas Elétricas Pela Análise de Vibração*, Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2011/2012.
- [10] GEITNER, FRED K., AND HEINZ P. BLOCH. 2012. “Machinery Failure Analysis and Troubleshooting.” *Machinery Failure Analysis and Troubleshooting*, 87–293. doi:10.1016/B978-0-12-386045-3.00003-9.
- [11] G. Kaiser, *A Friendly Guide to Wavelets*, Boston: Birkhauser, 1994.

- [12] HEYLEN, W, AND S LAMMENS. 1996. "FRAC: A Consistent Way of Comparing Frequency Response Functions." Proceedings, International Conference on Identification in Engineering, Swansea.
- [13] H. Nyquist, "Certain topics in telegraph transmission theory", Trans. AIEE, vol. 47, pp. 617–644, Apr. 1928 Reprint as classic paper in: *Proc. IEEE, Vol. 90, No. 2, Feb 2002*
- [14] IRDBalancing. 1940. "Balance Quality Requirements of Rigid Rotors. The Practical Application of ISO 1940/1." Quality, 11. [www.irdbalancing.com](http://www.irdbalancing.com).
- [15] J. Cabral, *Gestão da Manutenção de equipamentos, instalações e Edifícios*, 3ª edição. LIDEL - Edições Técnicas Limitada, 2013.
- [16] KEHTARNAVAZ, NASSER, AND NAMJIN KIM. 2005. Digital Signal Processing System-Level Design Using LabVIEW. Digital Signal Processing System-Level Design Using LabVIEW. 15 doi:10.1016/B978-075067914-5/50024-6.
- [17] KREYSZIG, ERWIN. 2006. "Advanced Engineering Mathematics." The Mathematical Gazette. doi:10.2307/3612523.
- [18] LAGO, DANIEL FABIANO, AND APARECIDO CARLOS GONÇALVES. 2006. "Manutenção Preditiva De Um Redutor Usando Análise De Vibrações E De Partículas De Desgaste." In 16o Simpósio de Pós-Graduação Em Engenharia Mecânica, 10. <http://www.posgrad.mecanica.ufu.br/posmec/16/PDF/PM16-0087.pdf>.
- [19] L. S. SOUSA, M. B. Rodrigues (slides).
- [20] M. AKAY, "Wavelets in biomedical engineering," *Annals of Biomeical Engineering*, vol. 23, no. 5, pp. 531–542, 1995.
- [21] M. AKAY, "Biomedical Signal Processing," Academic Press, 1994.
- [22] Norma EN 13306:2010-en, "Manutenção. Terminologia da manutenção."
- [23] National Instruments, "LabVIEW - User Manual," January 1998.
- [24] NOWLAN, STANLEY, AND HOWARD HEAP. 1978. "Reliability Centered Maintenance." United Airlines-MDA 903-75-C-0349, 476.
- [25] ROQUE, ANTÓNIO A. e SILVA, TIAGO A. N., *Optimização do Processo de Equilíbrio Dinâmica – Metodologia Multiponto*, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2008.

- [26] ROQUE, ANTÓNIO A., *Equilibragem Dinâmica no Local. Dos Conceitos à Prática*, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2002.
- [27] R. G. LYONS, "Understanding Digital Signal Processing," *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 40. p. 665, 2004.
- [28] R. K. MOBLEY, *Vibration fundamentals*. Newnes, 1999.
- [29] R. L. ALLEN AND D. W. MILLS, "Frontmatter," in *Signal Analysis*, Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2003, pp. i–xxi.
- [30] P. Girdhar and C. Scheffer, *Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance*. Elsevier, 2004.
- [31] SAMPAIO, C. 2004. *Conceitos Básicos de Vibração*. Escola Náutica I.D.Henrique.
- [32] SCHEFFER, C, and P GIRDHAR, *Machinery Vibration Analysis & Predictive Maintenance*, First Published Elsevier, <http://medcontent.metapress.com/index/A65RM03P4874243N.pdf%5Cnhttp://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Machinery+Vibration+Analysis+&+Predictive+Maintenance#1>.
- [33] S. S. RAO. 2011. *Mechanical Vibrations*, Fifth Edition, Pearson.
- [34] THOMSON, W. T., DAHLEH, M. D. 1998. *Theory of Vibration with Applications*, 5 ed. New Jersey, Prentice-Hall, Inc..
- [35] VANCE, J. M. 1988. *Rotordynamics of turbomachinery*, 1 ed. Texas, John Wiley & Sons, Inc.



# 6 Anexo

## Anexo A - Norma ISO 10816 parte 3

Green: Zone A  
Vibration values from machines just put into operation.

Yellow: Zone B  
Machines can run in continuous operation without any restrictions

Orange: Zone C  
Vibration values in yellow indicate that the machine condition is not suitable for continuous operation, only for a limited period of time. Corrective measures should be taken at the next opportunity.

Red: Zone D  
Dangerous vibration values – damage could occur to the machine.

